



Estudo e Caracterização Mecânica de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais

BRUNO FRANCISCO MORTE DE CASTRO

Julho de 2013



ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS

BRUNO FRANCISCO MORTE DE CASTRO

Dissertação elaborada para obtenção do grau de
MESTRE EM MECÂNICA — MATERIAIS E TECNOLOGIAS DE FABRICO

Orientador: Professor Doutor João Francisco M. Gomes da Silva

Co-Orientador: Professor Doutor João Pedro Nunes

JULHO DE 2013

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho, apenas foi possível graças à ajuda de diversas pessoas e instituições, às quais desejo sinceramente agradecer:

Professor João Francisco Machado Gomes da Silva, Professor no Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto (DEM-ISEP), orientador deste trabalho, pela incansável ajuda e disponibilidade, pelo apoio e transmissão dos seus conhecimentos científicos e experimentais, e pela sua amizade e simpatia que, desde sempre, constituíram um enorme estímulo para a conclusão desta dissertação.

Professor João Pedro L. Gil Nunes, Professor do Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho (DEP-UM), também orientador deste trabalho, pelo, apoio e principalmente pela transmissão dos seus conhecimentos, na área dos materiais compósitos.

Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP, pela disponibilização dos materiais e equipamentos tecnológicos essenciais à realização deste trabalho.

Departamento de Engenharia Têxtil da Universidade do Minho, na pessoa da Cátia Relvas, pela disponibilidade para a realização de parte do presente trabalho.

Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros (PIEP), pela disponibilização de equipamentos necessários à concretização deste trabalho.

Aqui fica também o meu obrigado às seguintes pessoas:

Professor Arnaldo Manuel Guedes Pinto, Professor no DEM-ISEP, pela colaboração na preparação dos ensaios.

Engenheira Maria de Fátima Andrade, pelo apoio técnico nos laboratórios do DEM-ISEP.

Ana Catarina F.M. Duro, pelo companheirismo, colaboração e apoio.

Por fim, gostaria de agradecer à minha família, aos meus pais, ao meu irmão, à minha namorada e aos meus amigos pelo apoio e encorajamento.

RESUMO

As crescentes preocupações ambientais e a necessidade de um desenvolvimento sustentável tem proporcionado um grande interesse no estudo e desenvolvimento de materiais mais ecológicos e amigos do ambiente. No caso particular da indústria dos materiais compósitos, a utilização de fibras naturais de origem vegetal, em substituição das tradicionais fibras de vidro, tem aumentado significativamente nos últimos anos. Para além dos claros benefícios ecológicos, a utilização de fibras naturais em detrimento das fibras de vidro, possibilita também o fabrico de componentes com baixo peso, boas propriedades mecânicas, baixo custo, pouco abrasivos às ferramentas de produção e com boas propriedades de isolamento térmico e acústico. Contudo, existem também algumas limitações decorrentes da utilização de fibras naturais como reforço de materiais poliméricos, como exemplo, a possibilidade de emitirem odores e absorverem água, a falta de adesão entre as fibras e as matrizes e o facto de possuírem baixa resistência à temperatura.

No presente trabalho, foram estudadas e analisadas as propriedades mecânicas de laminados de matriz termoendurecível de epóxico e poliéster, reforçados com várias camadas de tecido bidireccional de fibras de juta. Para além dos referidos laminados, foram também produzidos e estudados compósitos de matriz termoplástica biodegradável de PLA (ácido poliláctico), reforçados com fibras curtas de juta. Todos os compósitos produzidos foram sujeitos a ensaios de tracção e flexão e as suas propriedades foram comparadas.

O tecido de juta utilizado como reforço dos compósitos fabricados, foi caracterizado através de vários ensaios, utilizados tipicamente na indústria têxtil. As propriedades extraídas destes ensaios, foram úteis para a previsão das propriedades mecânicas dos materiais compósitos fabricados.

Por fim, foi realizada uma análise crítica sobre todos os resultados extraídos dos ensaios efectuados.

ABSTRACT

The growing environmental issues and sustainable development concepts are pushing the research and development of more ecologically friendly material solution. In the composite materials industry the use of material fibers as alternative to more traditional glass fibers is increasing over time. Apart from evident ecological benefits, the use of material fibers allows the production of components with low weight, good mechanical proprieties, low cost and with a good insulation and thermal behavior. As disadvantages, the possibility of water retention, the poor fiber/matrix interface adhesion and the low temperature resistance are major problems.

In this work, the mechanical proprieties of several jute reinforced composite material were determined and obtained result discussed. The studied matrices were: polyester, epoxy and PLA (Polylactic acid).

The jute was obtained in fabric and the usual textile characterization tests were done in this reinforcement.

Finally, the main conclusion obtained from all testing was presented.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
LISTA DE ABREVIATURAS	IX
1. ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS DO TRABALHO	1
1.1. Enquadramento da Dissertação	3
1.2. Objectivos	5
2. ESTADO DA ARTE	7
2.1. Introdução	9
2.2. Matrizes	10
2.2.1. Termoendurecíveis	12
2.2.1.1. Resina de Poliéster Insaturado	13
2.2.1.2. Resina de Epóxido	14
2.2.2. Termoplásticos	15
2.2.2.1. PLA (ácido poliláctico)	16
2.3. Fibras de Reforço	17
2.3.1. Fibras Sintéticas	20
2.3.1.1. Fibras de vidro	20
2.3.2. Fibras Naturais	22
2.3.2.1. Classificação das Fibras Naturais	24
2.3.2.2. Estrutura e Constituintes das Fibras Naturais	25
2.3.2.3. Fibras extraídas de sementes das plantas	30
2.3.2.4. Fibras extraídas do fruto das plantas	31
2.3.2.5. Fibras extraídas do caule das plantas	32
2.3.2.6. Fibras extraídas da folha das plantas	37
2.3.2.7. Propriedades Físicas e Mecânicas das Fibras Naturais	39
2.3.2.8. Fibras de juta	43
2.4. Técnicas de fabrico de compósitos reforçados com fibras naturais	57
2.4.1. Moldação Manual	58
2.4.2. Moldação Manual Assistida por Vácuo	59
2.5. Aplicação de compósitos reforçados com fibras naturais	60
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	65
3.1. Introdução	67
3.2. Matérias-primas	67
3.2.1. Matrizes	67
3.2.1.1. Resina de Poliéster Insaturado Ortoftálico	67
3.2.1.2. Resina de Epóxido	68
3.2.1.3. PLA (ácido poliláctico)	68
3.2.2. Tecido de juta	69
3.2.2.1. Determinação da massa por unidade de superfície	70
3.2.2.2. Determinação da massa linear	72
3.2.2.3. Contracção dos fios	75

3.2.2.4.	Contextura do tecido	75
3.2.2.5.	Determinação da massa específica da juta.....	76
3.2.2.6.	Determinação da área da secção transversal dos fios de juta	79
3.2.2.7.	Ensaio de tracção do tecido de juta.....	83
3.2.3.	Fabrico e Caracterização de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais.....	85
3.2.3.1.	Propriedades da camada	95
3.2.3.2.	Ensaio de Tracção.....	97
3.2.3.3.	Ensaio de Flexão.....	100
4.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	107
4.1.	Introdução.....	109
4.2.	Caracterização das matérias-primas.....	109
4.2.1.	Caracterização do Reforço de Juta	109
4.2.2.	Caracterização dos Compósitos Produzidos	112
4.2.2.1.	Determinação das propriedades da camada	113
4.2.2.2.	Resultados do Ensaio de Tracção.....	115
4.2.2.3.	Resultados do Ensaio de Flexão	117
5.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	119
5.1.	Análise dos Resultados.....	121
5.2.	Trabalhos Futuros	126
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
	ANEXOS	133

LISTA DE ABREVIATURAS

A_{fio}	área da secção transversal dos fios (mm^2)
A_{pc}	área conhecida de 100 cm^2 do provete circular
E_1	módulo de elasticidade da camada na direcção da fibras (GPa)
E_f	módulo de elasticidade à flexão (GPa)
E_f	módulo de elasticidade das fibras (GPa)
E_p	módulo de elasticidade da matriz (GPa)
G_f	gramagem do tecido (g/m^2)
M_{lin}	massa linear ($\text{tex}=\text{g/km}$)
R^2	qualidade do ajuste da recta de regressão linear
X_1	resistência mecânica da camada na direcção das fibras (MPa)
X_f	resistência mecânica das fibras (MPa)
X_f^*	resistência mecânica das fibras para uma deformação igual à deformação de rotura da matriz (MPa)
X_p	resistência mecânica da matriz (MPa)
c_f	comprimento do fio (km)
c_{ft}	comprimento do fio tensionado (km)
m_d	declive da recta da zona linear da curva carga-deflexão
m_{fio}	massa do fio (g)
m_{pc}	massa do provete circular (g)
m_{tecido}	massa do provete de tecido (g)
ε_{ext}	deformação determinada a partir dos valores lidos no extensómetro
ε_f	deformação de flexão
v_f	fracção volúmica de fibras
ρ_c	massa específica do compósito (kg/m^3)
ρ_f	massa específica das fibras de juta (kg/m^3)
ρ_p	massa específica do polímero usado como matriz (kg/m^3)
ρ_{tecido}	massa específica do tecido (g/cm^3)
σ_0	tensão residual a que o provete estava inicialmente sujeito (MPa)
σ_f	tensão de rotura à flexão (MPa)

ω_f	fracção mássica (ou ponderal) de fibras
ΔV	volume de líquido deslocado (ml=cm ³)
h	espessura do provetes de ensaio de flexão (mm)
E	módulo de elasticidade à tracção (GPa)
F	força transversal aplicada (MPa)
L	distância entre apoios no ensaio de flexão (mm)
b	largura do provete (mm)
n	número de camadas do laminado
s	flecha medida a meio vão nos provete de flexão (mm)
ε	deformação aplicada
η	factor de arranjo das fibras
θ	ângulo das microfibrilas (°)
σ	tensão de rotura à tracção (MPa)

1. ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS DO TRABALHO

1.1. Enquadramento da Dissertação

Desde os primórdios da humanidade, que as fibras naturais são utilizadas como forma de melhorar as propriedades dos materiais [1]. Um exemplo disso, referido no Antigo Testamento, são os tijolos de argila reforçados com fibras de palha. Para além deste exemplo, outras aplicações importantes na história da humanidade fizeram uso das fibras naturais. Os principais exemplos disso são os produtos têxteis e o papel [2]. No início do século XX, o grande desenvolvimento tecnológico e a necessidade de produção em massa a custos reduzidos, levou à substituição das matérias-primas naturais por produtos sintéticos. Estes, possibilitam a produção de materiais com excelentes características mecânicas, a baixo custo, sendo susceptíveis de serem facilmente produzidos em massa [3].

A partir dos anos 90, a crescente consciência da necessidade de um crescimento sustentável levou ao ressurgimento das fibras naturais [4]. Este ressurgir, em muito se deveu às pressões governamentais sobre as empresas. Com o objectivo de quebrar o paradigma do desenvolvimento industrial como inimigo do meio ambiente, as indústrias viram-se forçadas a desenvolver as suas actividades, tendo em linha de conta a variável ambiente.

No caso particular dos materiais compósitos, a substituição das fibras sintéticas por fibras naturais, além dos claros benefícios ecológicos, têm ainda algumas vantagens no que diz respeito às propriedades mecânicas [5]. Fibras naturais como a juta, sisal, linho e algodão possuem uma baixa densidade, boa resistência mecânica, baixa abrasão às ferramentas de corte ou furação, baixo custo e, comparativamente às fibras de vidro, possuem uma boa rigidez específica (quociente entre o módulo de elasticidade da fibras e a densidade da respectiva fibra), tal como mostra a Tabela 1.1 [6].

Tabela 1.1 – Principais propriedades mecânicas das fibras naturais e das fibras sintéticas mais utilizadas (adaptado de [6])

Fibras		Massa específica (kg/m³)	Alongamento (%)	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo de elasticidade específico (GPa)
Naturais	Algodão	1500-1600	7,0-8,0	287-597	5,5-12,6	3,4-8,4
	Juta	1300	1,5-1,8	393-773	26,5	20,4
	Linho	1500	2,7-3,2	345-1035	27,6	18,4
	Cânhamo	1400	1,6	690	70,0	50,0
	Rami	1500	3,6-3,8	400-938	61,4-128,0	41,0-85,3
	Sisal	1500	2,0-2,5	511-635	9,4-22,0	6,3-14,7
	Coco	1200	30,0	175	4,0-6,0	3,3-5,0
Sintéticas	Vidro E	2500	2,5	2000-3500	70,0	28,0
	Aramida	1400	3,3-3,7	3000-3150	63,0-67,0	45,0-47,9
	Carbono	1400	1,4-1,8	4000	230,0-240,0	164,3-171,4

No ramo da indústria automóvel, factores como a redução de custos, melhoramento da eficiência nos consumos de combustível e a necessidade de cumprimento de novas leis (reciclagem de veículos em fim de vida) levaram a indústria automóvel a ser pioneira na substituição de compósitos com fibras de vidro por compósitos com fibras naturais [7] como mostra a Figura 1.1 [8, 9].

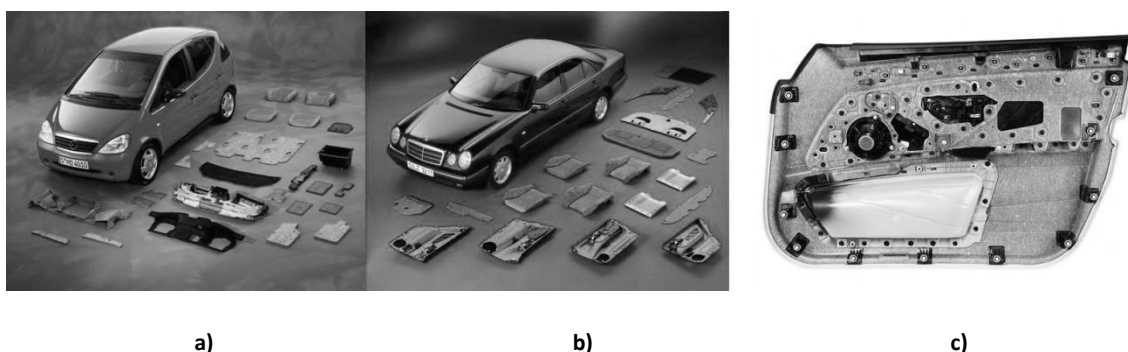


Figura 1.1 – Exemplos da aplicação de Fibras Naturais na Indústria Automóvel a) Mercedes-Benz Classe A: 27 componentes plásticos reforçados com fibras naturais; b) Mercedes-Benz Classe E: 21 componentes plásticos reforçados com fibras naturais [8]; c) Painel da porta do BMW Série 5 em compósito reforçado com fibras de cânhamo [9]

Apesar de todo o esforço que tem sido levado a cabo para a utilização de fibras naturais, estas, possuem algumas limitações inerentes à sua natureza. As principais desvantagens da utilização de fibras naturais em materiais compósitos são: a fraca adesão na interface (principalmente com polímeros termoplásticos), podem emitir odores, são materiais higroscópicos e têm baixa resistência à temperatura. Contudo, um conhecimento cada vez mais aprofundado sobre todas as características das fibras naturais, tem permitido o desenvolvimento de técnicas de tratamentos que permitem colmatar as principais limitações do uso de fibras naturais em materiais compósitos.

O vasto campo de aplicação, os vários tipos de fibras existentes na natureza e o grande crescimento na utilização dos materiais compósitos reforçados com fibras naturais, justificam a investigação e estudo realizado na presente dissertação.

1.2. Objectivos

Os principais objectivos do presente trabalho, foram o fabrico e a caracterização mecânica de materiais compósitos reforçados por fibras naturais. As fibras naturais, quando utilizadas como material de reforço de polímeros, permitem não só obter componentes com boas propriedades mecânicas, como também reduzir o peso dos mesmos. Para além disso, quando as fibras naturais são incorporadas em matrizes obtidas a partir de recursos renováveis (biopolímeros), possibilitam o fabrico de um material compósito totalmente biodegradável e nesse sentido, amigo do ambiente.

Para além da selecção e caracterização têxtil do reforço fibroso a ser utilizado, foi também objectivo do presente trabalho, a caracterização e comparação de compósitos fabricados com diferentes tipos de matrizes. Para tal, foram seleccionadas matrizes poliméricas com aplicações, custos e propriedades bastante distintas. A escolha do processo de fabrico de compósitos que melhor se adapta a cada uma das matrizes escolhidas foi também levada em consideração.

A comparação entre as propriedades mecânicas esperadas e aquelas que efectivamente foram obtidas nos ensaios dos compósitos produzidos, foi outro dos objectivos deste estudo.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Introdução

Existe, actualmente, uma grande variedade de materiais que são constituídos por, pelo menos duas fases distintas, materiais estes que se designam por compósitos. Embora esta definição englobe um grande campo de materiais, que vão desde o betão armado até aos compósitos de alto desempenho com reforços à base de fibras de carbono ou aramídicas, apenas se abrangem nesta dissertação os polímeros reforçados com fibras. Estes materiais resultam da dispersão das fibras que são o material de reforço, num material aglomerante que se designa por matriz. O reforço caracteriza-se por possuir maior rigidez e resistência mecânica, enquanto a matriz, para além de proteger a superfície das fibras, tem também a função de garantir uma boa transmissão e repartição dos esforços aplicados ao compósito.

Enquanto os materiais de construção mecânica tradicionais (materiais metálicos), sofrem um indesejado aumento da fragilidade com o incremento da resistência, os polímeros reforçados com fibras permitem incrementar simultaneamente a resistência e a tenacidade [3, 10]. Para além disso, os materiais compósitos possuem uma elevada resistência específica, leveza, facilidade de processamento e uma enorme liberdade de concepção dos produtos. Por estes motivos, os materiais compósitos difundiram-se ao longo de várias décadas, em áreas tão distintas como a indústria aeronáutica, automóvel, artigos desportivos e ainda a indústria espacial e de defesa [1].

Apesar de todas as qualidades atractivas que os polímeros reforçados com fibras apresentam, existe hoje em dia a consciência da necessidade de um crescimento sustentável, baseado na utilização de materiais amigos do ambiente. Esta mudança representa em termos práticos, a substituição dos recursos não renováveis por matérias-primas que possam ser recicláveis, reutilizáveis e biodegradáveis.

A adopção de medidas, que promovem a construção de automóveis com base em materiais biodegradáveis ou recicláveis, por parte de alguns países europeus, tem levado a indústria automóvel a mostrar um grande interesse no desenvolvimento de materiais compósitos reforçados com fibras naturais. Fibras como as de linho, cânhamo, juta e sisal têm sido utilizadas na construção de componentes automóveis como painéis das portas, assentos e

tablier. Tal como documenta a Figura 2.1, a procura tem vindo a aumentar ao longo dos últimos anos, e é de esperar que esta utilização continue em crescendo [5, 11].

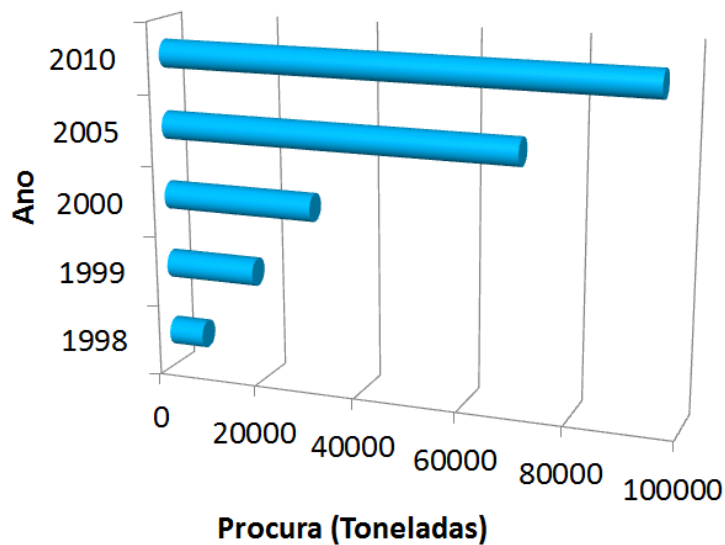


Figura 2.1 – Consumo de fibras naturais na Europa ocidental [11]

Assim, no campo dos polímeros reforçados com fibras, vários estudos e investigações têm sido levadas a cabo com o propósito de conhecer e compreender o comportamento das fibras naturais de origem vegetal, tendo em vista a substituição das tradicionais fibras sintéticas. Para algumas aplicações, as fibras naturais começam agora a ser uma alternativa às tradicionais fibras sintéticas, especialmente as fibras de vidro [11].

2.2. Matrizes

Existe actualmente uma grande variedade de matrizes poliméricas utilizadas no fabrico de materiais compósitos, contudo os diferentes tipos de matrizes podem ser agrupados em dois grandes grupos (Figura 2.2): as matrizes termoplásticas e as matrizes termoendurecíveis.

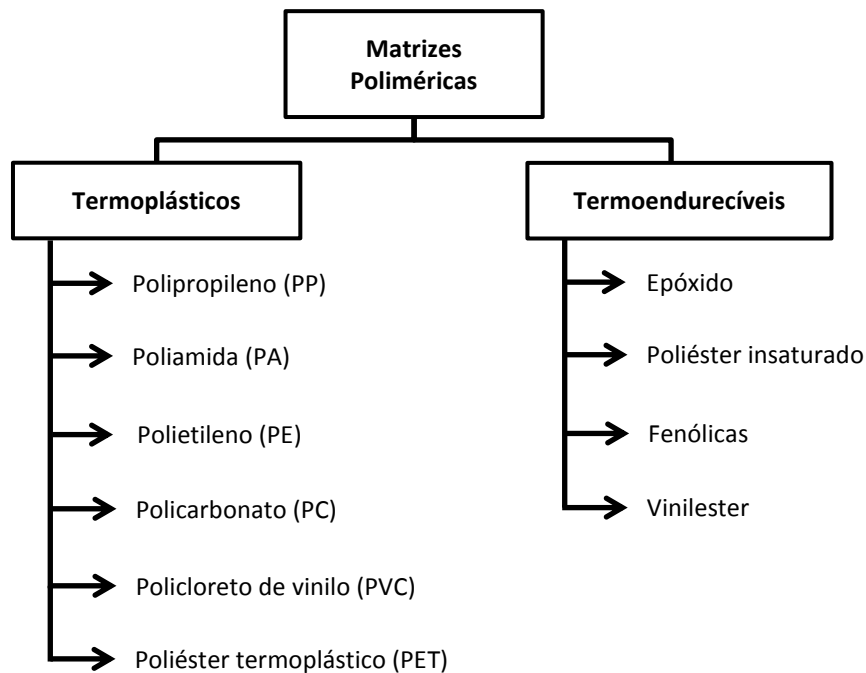


Figura 2.2 – Exemplos de matrizes poliméricas termoplásticas e termoendurecíveis

A escolha do tipo de matriz polimérica a utilizar, depende muito dos requisitos exigidos aos componentes finais que se pretendem fabricar. Os principais factores que influenciam a escolha do tipo de polímero a utilizar são o custo, o desempenho térmico e o desempenho mecânico [3]. Para além dos factores já referidos, é também muito importante que a matriz cumpra na íntegra as suas funções como por exemplo: proteger as fibras do contacto com o meio ambiente, transmissão de esforços às fibras, promover a ligação entre as fibras e garantir o alinhamento pretendido para estas.

Os polímeros termoplásticos são formados por moléculas de grandes dimensões, também designadas por macromoléculas. Estas macromoléculas têm a particularidade de não reticular entre si (criar ligações cruzadas a cadeias moleculares vizinhas), contrariamente ao que acontece com os polímeros termoendurecíveis. As ligações existentes nos termoplásticos que mantêm as macromoléculas nas suas posições são as chamadas ligações secundárias, ou seja, ligações de hidrogénio e forças de van Der Waals. O facto de estas ligações serem quebradas temporariamente quando o polímero é aquecido, permite o reprocessamento (fundição e solidificação) sem que exista uma perda significativa das características do polímero [11]. Comparativamente às matrizes termoendurecíveis, os

termoplásticos possuem melhor resistência ao impacto, são mais tenazes, menos higroscópicos e podem ser reciclados [12]. A principal desvantagem que tem limitado o seu uso nos materiais compósitos é a grande dificuldade de impregnação completa das fibras [1, 10]. Os exemplos mais comuns de polímeros termoplásticos são o polipropileno (PP), poliamida (PA), polietileno (PE), policarbonato (PC), policloreto de vinilo (PVC) e poliéster termoplástico (PET).

Os polímeros termoendurecíveis, vulgarmente designados por resinas termoendurecíveis, são constituídos por cadeias moleculares que formam uma estrutura tridimensional graças à reticulação entre as várias cadeias moleculares [11, 12]. Normalmente este tipo de resinas é comercializado sob a forma de uma mistura de dois ou três componentes: resina, catalisador e acelerador. Em alguns casos a polimerização e reticulação ocorre após a mistura dos referidos componentes à temperatura ambiente, enquanto outros tipos de termoendurecíveis exigem a aplicação de calor e pressão adicional para que o processo de cura se realize. Depois do processo de cura se dar, não existe a possibilidade de reprocessar este tipo de matriz polimérica, sendo esta uma das principais desvantagens associada aos termoendurecíveis. Contudo, a baixa viscosidade deste tipo de resinas antes da cura, é uma clara mais-valia para a impregnação das fibras. Comparativamente aos termoplásticos, a utilização de matrizes termoendurecíveis permite obter compósitos com mais resistência e rigidez [1]. Os exemplos mais comuns de resinas termoendurecíveis são as resinas de epóxido, poliéster insaturado, fenólicas e vinilester.

Em resumo, verifica-se que a vasta gama de materiais poliméricos utilizados como matrizes de materiais compósitos permite a concepção de produtos com características muito distintas. Em termos práticos, a escolha de uma matriz termoplástica ou termoendurecível, conduz não só a produtos com diferentes especificidades, mas também à utilização de técnicas de fabrico muito distintas.

2.2.1. Termoendurecíveis

Antes do processo de cura acontecer, os termoendurecíveis são formados por macromoléculas (cadeias moleculares) independentes, tal como os termoplásticos. Durante

o processo de cura, as cadeias moleculares deixam de ser independentes ao criarem ligações cruzadas com as cadeias vizinhas. A este processo dá-se o nome de reticulação. A reticulação limita a mobilidade das macromoléculas e traz consigo algumas vantagens e desvantagens. As matrizes termoendurecíveis suportam temperaturas elevadas, têm boa estabilidade térmica e dimensional, têm elevada rigidez e permitem uma fácil impregnação das fibras [13]. Por outro lado, o processo de cura não é instantâneo e isso implica um aumento dos tempos do ciclo de produção, sendo por vezes necessário adicionar calor para completar a reticulação o que conduz a custos adicionais de processamento. Para além destas limitações, as matrizes termoendurecíveis não podem ser recicladas, ou seja, uma vez processadas assumem uma forma permanente [14].

Existe uma grande variedade de termoendurecíveis que são utilizados como matrizes de materiais compósitos. As mais utilizadas para aplicações não-estruturais ou semi-estruturais são as resinas de poliéster insaturado. Estas são relativamente baratas e possuem boas propriedades mecânicas. No campo dos compósitos de alta resistência, os epóxidos são as resinas mais usuais e, comparativamente às resinas de poliéster, são mais caras possuindo no entanto propriedades mecânicas superiores [1].

2.2.1.1. Resina de Poliéster Insaturado

As resinas de poliéster insaturado são largamente utilizadas no fabrico de materiais compósitos. A designação de “insaturado” deve-se ao facto de existirem ligações covalentes duplas na cadeia molecular, que não se encontram saturadas com átomos de hidrogénio [15]. O processo de reticulação deste tipo de polímero ocorre apenas na presença de um catalisador, normalmente um peróxido. A reacção ocorre de forma faseada e pode ser acelerada recorrendo à aplicação de calor, ou através da adição de um acelerador. Numa primeira fase, a resina toma a forma de um produto muito viscoso ao qual se dá o nome de “ponto de gel”, e posteriormente dá-se o endurecimento final. Nesta fase final, ocorre libertação de calor [1, 15].

A utilização em larga escala deste tipo de resinas, em muito se deve à combinação de boas propriedades mecânicas aliadas ao baixo custo e facilidade de processamento. A principal

desvantagem deste tipo de termoendurecíveis é a contracção que ocorre durante o processo de cura [13]. A contracção pode produzir tensões internas que tornam o material compósito menos resistente a solicitações de fadiga.

2.2.1.2. Resina de Epóxico

As resinas de epóxico são bastante versáteis. Estas resinas encontram aplicação em campos bastante distintos, que vão desde a aplicação como adesivos, utilização como vernizes e tintas, e são muito utilizadas como matrizes de materiais compósitos. O baixo peso molecular da resina não curada no estado líquido, confere a estes polímeros uma grande mobilidade que permite uma boa impregnação das fibras. Esta é uma característica muito importante não só quando a resina é utilizada como matriz de materiais compósitos, mas também quando é utilizada como adesivo. O processo de cura deste tipo de resinas inicia-se com a adição de um agente endurecedor normalmente aminas aromáticas ou alifáticas [13, 16].

As propriedades finais deste tipo de resinas dependem das formulações químicas, da temperatura de cura e da realização de uma pós-cura. A fragilidade deste tipo de polímeros, por exemplo, pode ser colmatada através de aditivos de alta tenacidade [1, 13]. Um tratamento de pós-cura a temperaturas elevadas melhora não só as propriedades mecânicas, como permite ainda, aumentar a temperatura de transição vítrea [15].

Apesar do elevado custo das resinas de epóxico (cerca de quatro vezes superiores ao poliéster), estas possuem vantagens muito atractivas. Exemplos disso são: a baixa contracção no processo de cura que permite a redução das tensões internas (melhora a resistência à fadiga); excelente resistência à degradação; boa resistência à abrasão e à absorção de água; alto poder de colagem que evita a rotura por delaminação; a cura realiza-se sem a libertação de voláteis [1, 16].

A Tabela 2.1 [17] mostra, em resumo, as principais propriedades das resinas de epóxico e de poliéster.

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas das resinas de epóxico e de poliéster utilizadas como matrizes de materiais compósitos [17]

Propriedade	Resina de Epóxico (resina de alto desempenho usada na indústria aeroespacial)	Resina de poliéster insaturado ortoftálico
Tensão de rotura (MPa)	58,3	55
Módulo de elasticidade (GPa)	3,70	3,45
Deformação na rotura (%)	1,8	2,1
Massa específica (g/cm ³)	1,13	1,20

2.2.2. Termoplásticos

No caso dos termoplásticos, a rigidez e a resistência mecânica dependem do tamanho das cadeias moleculares, ao passo que os termoendurecíveis têm as suas propriedades mecânicas dependentes das ligações cruzadas entre cadeias moleculares vizinhas. Estas diferenças microestruturais, providenciam vantagens e desvantagens aos polímeros termoplásticos. As principais vantagens resultantes da utilização de matrizes termoplásticas são [18]:

- ✓ Os termoplásticos podem ser reciclados, reprocessados e reparados;
- ✓ O processamento pode ser bastante rápido;
- ✓ Os compósitos termoplásticos são mais dúcteis e possuem maior tenacidade à fractura.

A principal desvantagem é a elevada viscosidade que exige que o processamento se realize recorrendo a temperaturas e pressões elevadas. Para além de exigir um maior custo no processamento, no caso particular da utilização de fibras naturais como reforço, as elevadas temperaturas e pressões podem danificar as fibras.

Os polipropilenos, as poliamidas e os policarbonatos são os termoplásticos mais usados como matrizes de compósitos não estruturais e semi-estruturais. Termoplásticos como o

PEEK (Poli-éter-éter-cetona), Poliimidas e o PPS (Polisulfureto de fenileno) são mais utilizados para a produção de compósitos de alta resistência [1].

2.2.2.1. PLA (ácido poliláctico)

Um dos mais importantes polímeros sintéticos biodegradáveis é o PLA (ácido poliláctico). O PLA, pertencente à família dos poliésteres termoplásticos é obtido a partir de fontes renováveis, isto é, de produtos agrícola como o milho, cana-de-açúcar e beterraba. Comercialmente, o PLA é um polímero bastante atraente, graças às boas propriedades mecânicas aliadas à grande disponibilidade e biodegradabilidade que este material apresenta. As propriedades mecânicas que este polímero apresenta, são idênticas às propriedades dos tradicionais poliésteres obtidos de fontes não renováveis (fontes petrolíferas), e podem ser processados através de técnicas utilizadas normalmente no processamento de termoplásticos como por exemplo a extrusão e a injeção. As temperaturas de transição vítrea, de fusão e de degradação térmica do PLA são 60 °C, 180 °C, e 200 °C, respectivamente [19, 20]. As propriedades mecânicas do PLA estão apresentadas na Tabela 2.2 [21].

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas do PLA (adaptado de [21])

	Massa específica (kg/m ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de rotura (MPa)	Alongamento na rotura (%)
PLA	1240-1245	2,11	72	10,7

O PLA é utilizado em áreas bastante distintas como por exemplo na biomedicina, na indústria têxtil sobe a forma de fibras de PLA, na indústria de embalagens de produtos alimentares e na indústria automóvel. Na verdade, na indústria automóvel existe um grande interesse em colmatar a falta de adesão entre as fibras naturais e os polímeros termoplásticos, como por exemplo o PLA. A utilização de uma matriz polimérica de PLA reforçada por fibras naturais, permite o fabrico de compósitos completamente biodegradáveis [21].

2.3. Fibras de Reforço

O reforço fibroso de um material compósito consiste em milhares de filamentos individuais com diâmetros muito pequenos da ordem de micrómetros, dispersados no material polimérico (matriz). Tipicamente as propriedades mecânicas das fibras são de uma magnitude muito superiores às do polímero que elas reforçam. Contudo, a natureza filamentar das fibras impossibilita o seu uso directo em aplicações estruturais. Cabe assim à matriz, não só a função de dar forma estável aos compósitos, mas também assegurar a transmissão de esforços às fibras e proteger a superfície das mesmas [15]. Para além destes requisitos, exigidos às matrizes, também as fibras devem apresentar características que permitam reforçar os polímeros de uma forma eficaz. As fibras devem então possuir [10]:

- ✓ Módulo de elasticidade superior ao do polímero a reforçar;
- ✓ Tensão de rotura superior à do polímero a ser reforçado;
- ✓ Geometria adequada a uma boa adesão à matriz;
- ✓ Resistência à deterioração em contacto com a matriz.

Para além dos requisitos acima referidos, existem outros factores, relacionados com a natureza do reforço que influenciam as propriedades finais de um compósito. A quantidade de fibras, a sua orientação e o seu comprimento são características que influenciam de forma preponderante as características dos polímeros reforçados com fibras, de tal forma que os compósitos podem ser classificados segundo o esquema da Figura 2.3 [22]:

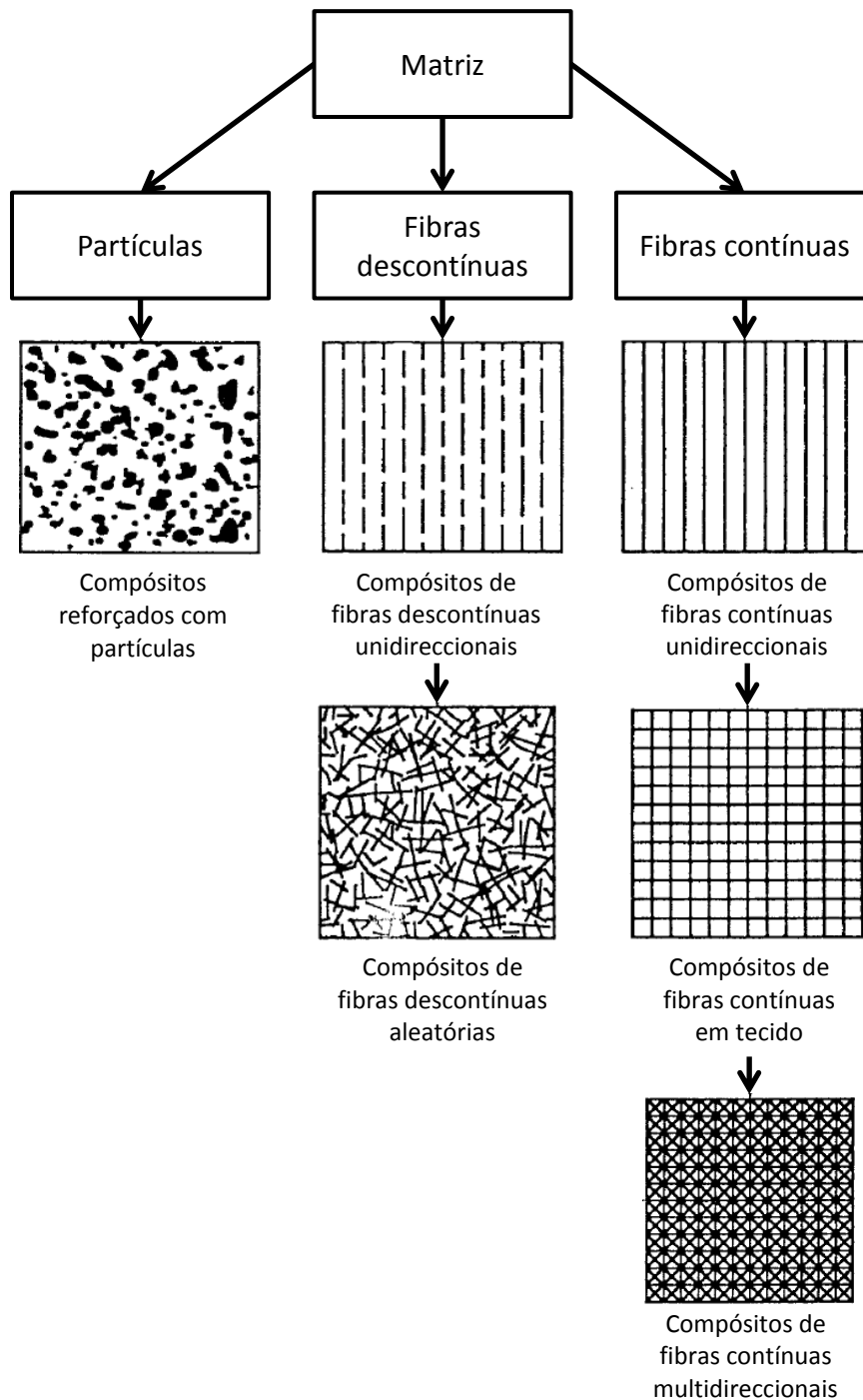


Figura 2.3 – Classificação dos materiais compósitos [22]

Os compósitos reforçados por partículas, são compostos por partículas de várias dimensões distribuídas aleatoriamente pela matriz. Esta aleatoriedade permite considerar este tipo de materiais como quase homogêneos, numa escala maior que o tamanho das partículas do reforço [22].

Os compósitos de fibras descontínuas, também designados por compósitos de fibras curtas, possuem o seu reforço sob a forma de fibras com comprimento que pode variar de 10 a 50mm [15]. As fibras podem ser orientadas numa determinada direcção, tornando o material compósito num material ortotrópico ou podem ser distribuídas aleatoriamente, tornando o material final num material com características quase homogéneas, ou seja, num material quase isotrópico [22].

Os compósitos de fibras contínuas possuem o seu reforço sob a forma de fibras muito longas sendo estes os compósitos com melhores propriedades mecânicas nomeadamente em termos de rigidez e resistência mecânica. Neste caso, as fibras podem ser orientadas numa só direcção, ou seja, paralelas entre si ou podem ser orientadas em duas direcções como é o caso dos tecidos. As fibras contínuas podem ainda ser orientadas em múltiplas direcções, o que fará do produto final, um compósito com características quase isotrópicas [22]. Importa ainda referir, que os compósitos reforçados com fibras contínuas, possuem normalmente uma quantidade relativamente grande de volume de fibras (entre os 20 e os 60%) [15].

A quantidade de fibras é outro aspecto, de grande importância, a ter em consideração para além da orientação e do comprimento das fibras. Verifica-se que as propriedades mecânicas melhoram com o aumento da fracção volúmica de fibras, até um dado valor. A partir de uma dada quantidade de reforço, verifica-se que a resina perde a capacidade de impregnar de uma forma eficaz todas as fibras, levando assim a um decréscimo das propriedades mecânicas finais do compósito.

As propriedades finais de um material compósito dependem também do tipo de fibras escolhido para o reforço. Os principais tipos de fibras podem ser divididos em dois grandes grupos, como mostra a Figura 2.4. Num grupo incluem-se as fibras fabricadas pelo homem, obtidas através de processos industriais, e num segundo grupo incluem-se as fibras naturais, criadas pela natureza.

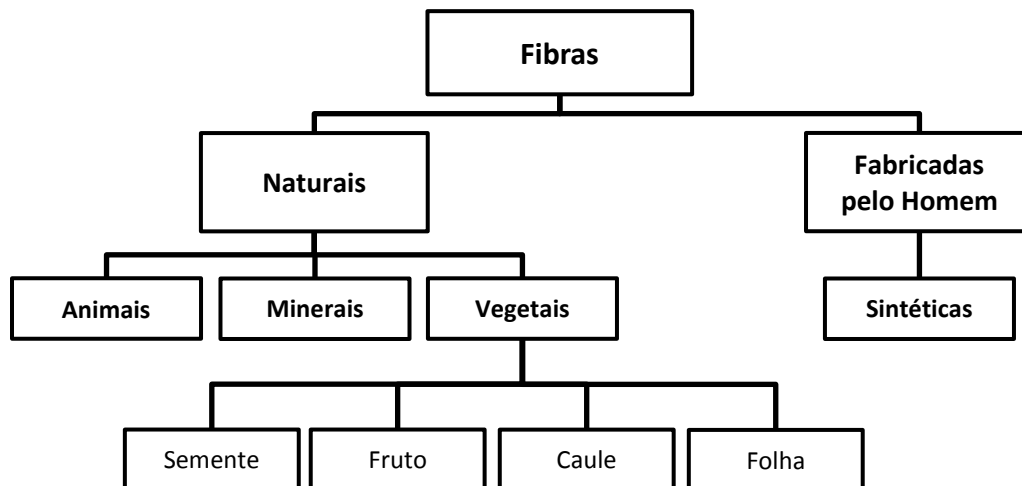


Figura 2.4 – Classificação dos diferentes tipos de fibras [23]

2.3.1. Fibras Sintéticas

As principais fibras sintéticas utilizadas como reforço de materiais compósitos são as fibras de vidro, de carbono e aramídicas. Dado o elevado custo de produção das fibras de carbono e aramídicas, estas apenas são utilizadas em aplicações exigentes como por exemplo a indústria aeronáutica e espacial [1]. As fibras de vidro são sem dúvidas as mais utilizadas, como reforço de materiais compósitos, estando presentes na esmagadora maioria das aplicações nos mercados de grande consumo.

Após algumas décadas de grande desenvolvimento tecnológico deste tipo de fibras (sintéticas), surge agora muito interesse na substituição das fibras sintéticas, principalmente das de vidro, por fibras naturais [6]. Este interesse em muito se deve às propriedades semelhantes que os compósitos reforçados com fibras de vidro e fibras naturais apresentam [11].

2.3.1.1. Fibras de vidro

As fibras de vidro são as mais utilizadas como reforço de materiais compósitos. O vidro, material amorfo e inorgânico, é constituído em grande parte por Dióxido de silício (SiO_2) [3,

16, 18]. Este composto químico representa cerca de 50 a 70% do peso total do vidro na maioria das formulações [15]. Existem várias formulações químicas possíveis na produção de fibras de vidro, que correspondem a diferentes tipos de fibras. Os três tipos mais comuns são: fibras de vidro do tipo E, tipo S e tipo R. Os principais constituintes químicos destes três tipos de fibras, estão apresentados na Tabela 2.3 [10, 24].

Tabela 2.3 – Constituintes químicos das fibras tipo E, tipo S e tipo R (adaptado de [10, 24])

Constituintes Químicos	Vidro E	Vidro S	Vidro R
Dióxido de silício (SiO_2)	52,4	64,4	60,0
Óxido de alumínio (Al_2O_3) + Óxido de ferro III (Fe_2O_3)	14,4	25,0	25,0
Óxido de cálcio (CaO)	17,2	-	9,0
Óxido de magnésio (MgO)	4,6	10,3	6,0
Óxido de sódio (Na_2O) + Óxido de potássio (K_2O)	0,8	0,3	-
Trióxido de boro (B_2O_3)	10,6	-	-

Os diferentes tipos de fibras possuem também características bastante distintas. Características como boa resistência química, o baixo custo, boas propriedades mecânicas e elétricas, fazem do vidro E o reforço mais utilizado nos materiais compósitos. As fibras do tipo S e tipo R, muito utilizadas na indústria aeronáutica, têm um custo mais elevado comparativamente com as do tipo E, sendo apenas utilizadas em compósitos avançados quando a resistência mecânica é um requisito fundamental [18]. Algumas propriedades importantes destes três tipos, estão apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Propriedades típicas das fibras tipo E, tipo S e tipo R [1, 3]

Propriedade	Vidro E	Vidro S	Vidro R
Densidade	2,6	2,49	2,55
Módulo de elasticidade (GPa)	73,0	85,5	86,0
Resistência à tracção (MPa)	3400	4580	4400
Deformação na rotura (%)	4,4	5,3	5,2
Coefficiente de expansão térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	5,0	2,9	4,0
Diâmetro das fibras (μm)	3-20	8-13	5-24

O método de produção de fibras de vidro mais utilizado é o estiramento do vidro fundido através de uma fieira. A temperatura de fusão do vidro depende da sua formulação mas geralmente ronda os 1260 °C [1, 18]. O vidro, no estado fundido, passa através dos pequenos e precisos orifícios numa fieira, o que permite obter fios com diâmetros de 3 a 30 μm [25]. À saída da fieira, as fibras são sujeitas a alguns tratamentos superficiais, antes de serem enroladas num mandril. Os tratamentos aplicados às fibras dependem do tipo de aplicação pretendido das referidas fibras. Um revestimento plástico, por exemplo, permite a compatibilização das fibras com as diferentes matrizes poliméricas [1].

2.3.2. Fibras Naturais

O termo fibras naturais engloba as fibras vegetais, animais e minerais. Contudo, na indústria dos materiais compósitos, este termo refere-se apenas às fibras de origem vegetal oriundas do caule, da semente, do fruto ou das folhas de algumas plantas. Estas fibras contribuem de uma forma preponderante para a sustentação da planta durante a sua vida e quando são utilizadas em materiais compósitos, as fibras naturais, sendo mais ecológicas que as sintéticas, conseguem providenciar propriedades mecânicas de grande interesse [11].

No campo dos materiais compósitos, as principais características que têm levado à substituição das fibras sintéticas, principalmente das de vidro, são o baixo custo, o baixo

peso, boa tenacidade, propriedades atractivas de isolamento térmico, eléctrico e acústico, boas propriedades mecânicas específicas [26], e a baixa abrasão aos equipamentos de processamento, que as fibras naturais apresentam [20].

Para além dos factores técnicos e económicos, as fibras naturais possuem também consideráveis vantagens ecológicas, entre as quais se destacam [27, 28]:

- ✓ A pouca energia requerida para a sua produção;
- ✓ São viáveis ecologicamente;
- ✓ Estão amplamente disponíveis em todo o mundo;
- ✓ Não são tóxicas;
- ✓ Uma vez que são um material orgânico, no seu fim de vida podem ser decompostas e utilizadas como fertilizantes dos solos;
- ✓ No seu fim de vida, podem também ser queimadas ou usadas como combustível.

Para além das vantagens referidas, as fibras naturais são neutras no que diz respeito às emissões de dióxido de carbono, uma vez que a quantidade de dióxido de carbono libertado na sua queima é sensivelmente a mesma que a planta consumiu durante o seu tempo de vida [20].

Contudo, existem algumas limitações na utilização das fibras naturais como reforço de materiais compósitos. As principais desvantagens decorrentes da utilização de materiais compósitos reforçados por fibras naturais são [28]:

- ✓ Geralmente possuem uma resistência mecânica inferior às fibras de vidro;
- ✓ Grande dispersão das propriedades, ou seja, uma qualidade não homogénea das fibras, dependente de muitos factores;
- ✓ Em contacto com a água, as fibras naturais apresentam: baixa resistência à absorção de água, alta absorção de humidade e baixa estabilidade dimensional;
- ✓ Fraca adesão na interface fibra-matriz que contribui também para um decréscimo das propriedades mecânicas;
- ✓ Baixa resistência térmica.

Tal como foi referido no parágrafo anterior, as propriedades das fibras naturais apresentam uma grande dispersão. Esta dispersão, considerada como uma enorme desvantagem, deve-se a vários factores, como por exemplo: idade e história da planta, tipo de solo e fertilizantes utilizados, processo de extracção das fibras, origem geográfica, condições de cultivo (humidade e temperatura), grau de maturidade da planta e época da colheita [26, 27].

Os benefícios e limitações decorrentes da utilização das fibras vegetais como reforço de materiais poliméricos, estão intrinsecamente relacionados com as suas propriedades físicas e químicas. Como tal, os seguintes subcapítulos serão dedicados à classificação, descrição da estrutura e das principais características químicas, físicas e mecânicas de diferentes tipos de fibras naturais, utilizados como reforço de materiais compósitos.

2.3.2.1. Classificação das Fibras Naturais

As fibras naturais podem ser classificadas segundo a região da planta de onde são extraídas [26]. O esquema da Figura 2.5 [6, 23] mostra essa classificação para as principais fibras naturais utilizadas como reforço de materiais compósitos.

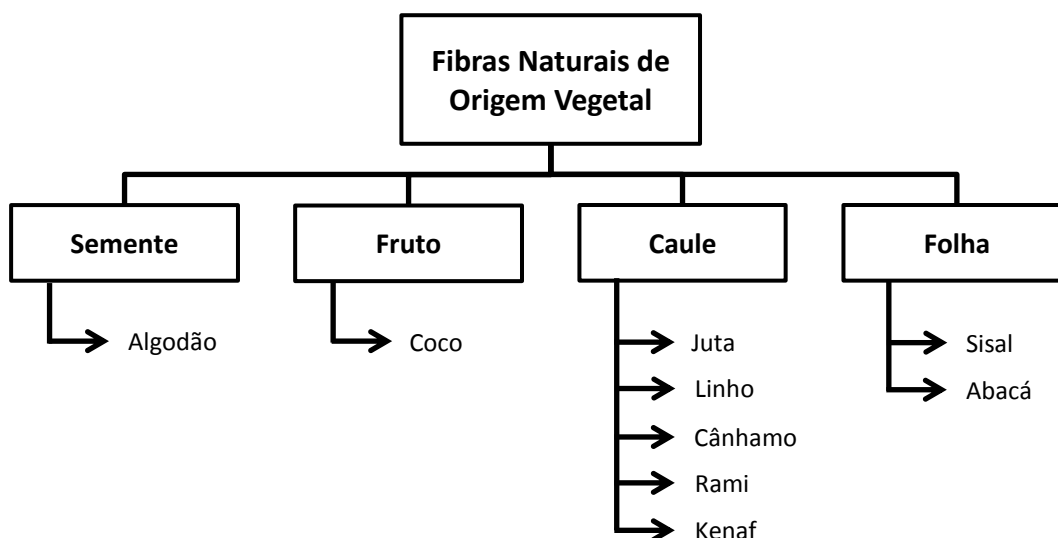


Figura 2.5 – Classificação das fibras naturais de origem vegetal (adaptado de [6, 23])

Esta classificação (de acordo com origem anatómica das fibras) é a mais usual, contudo as fibras naturais também podem ser classificadas de acordo com o propósito do cultivo das plantas. Neste sistema de classificação as plantas que são cultivadas especificamente para extracção das fibras (juta, algodão, cânhamo, sisal e kenaf), pertencem ao grupo primário. No grupo secundário, são incluídas as plantas que para além de produzirem fibras, produzem também outros bens como por exemplo, o coqueiro que para além das fibras produz também cocos, comercializados como produto alimentar [26, 29].

2.3.2.2. Estrutura e Constituintes das Fibras Naturais

As fibras naturais são consideradas como um material composto concebido pela natureza. Nas actuais aplicações de fibras vegetais, são usados feixes ou fios de fibras em vez das fibras elementares/individuais. As chamadas “Fibras Vegetais Técnicas” são constituídas pela ligação de várias fibras elementares ou células, formando assim feixes de fibras. Esta ligação é realizada através do material intercelular que pode ser a pectina e/ou a lenhina, que dá resistência ao conjunto como um todo [27].

A Figura 2.6 representa, de uma forma esquemática, a estrutura de um feixe de fibras vegetais e a constituição de uma fibra elementar.

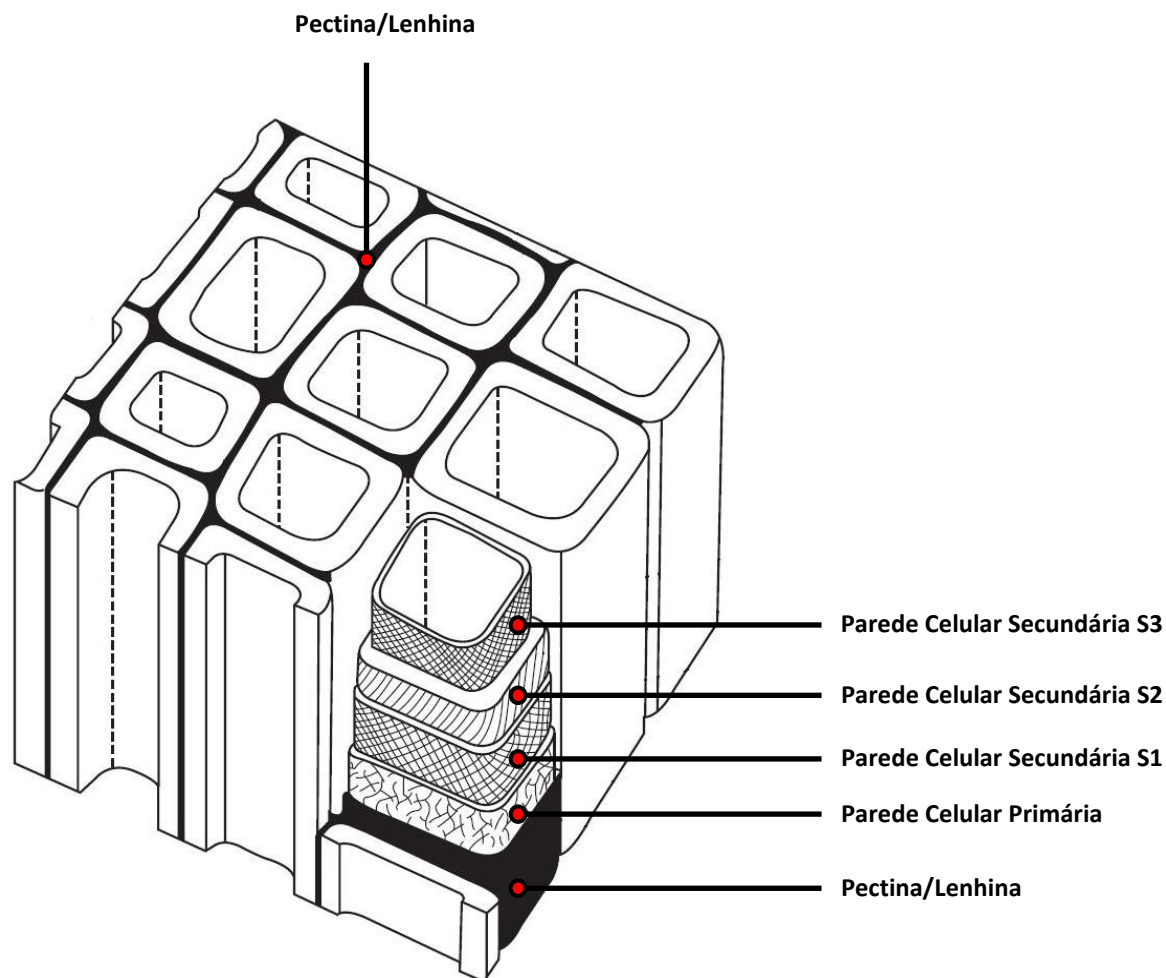


Figura 2.6 – Várias fibras elementares unidas por pectina/lenhina e pormenor das várias paredes celulares de uma fibra elementar (adaptado de [23])

Na maioria das actuais aplicações de compósitos reforçados por fibras naturais, são utilizadas, preferencialmente, as fibras vegetais técnicas ou fios de fibras, em vez das fibras elementares/individuais. Contudo, um conhecimento mais aprofundado sobre as fibras vegetais elementares, possibilita uma maior compreensão das especificidades e das características gerais que este tipo de reforço apresenta.

Basicamente, as fibras vegetais elementares são constituídas por várias paredes celulares, normalmente possuem comprimentos entre 1 e 50 mm e diâmetros tipicamente entre 10 e 50 μm . A sua estrutura física assemelha-se a um tubo microscópico (Figura 2.7), onde as paredes celulares cercam o lúmen central [27].

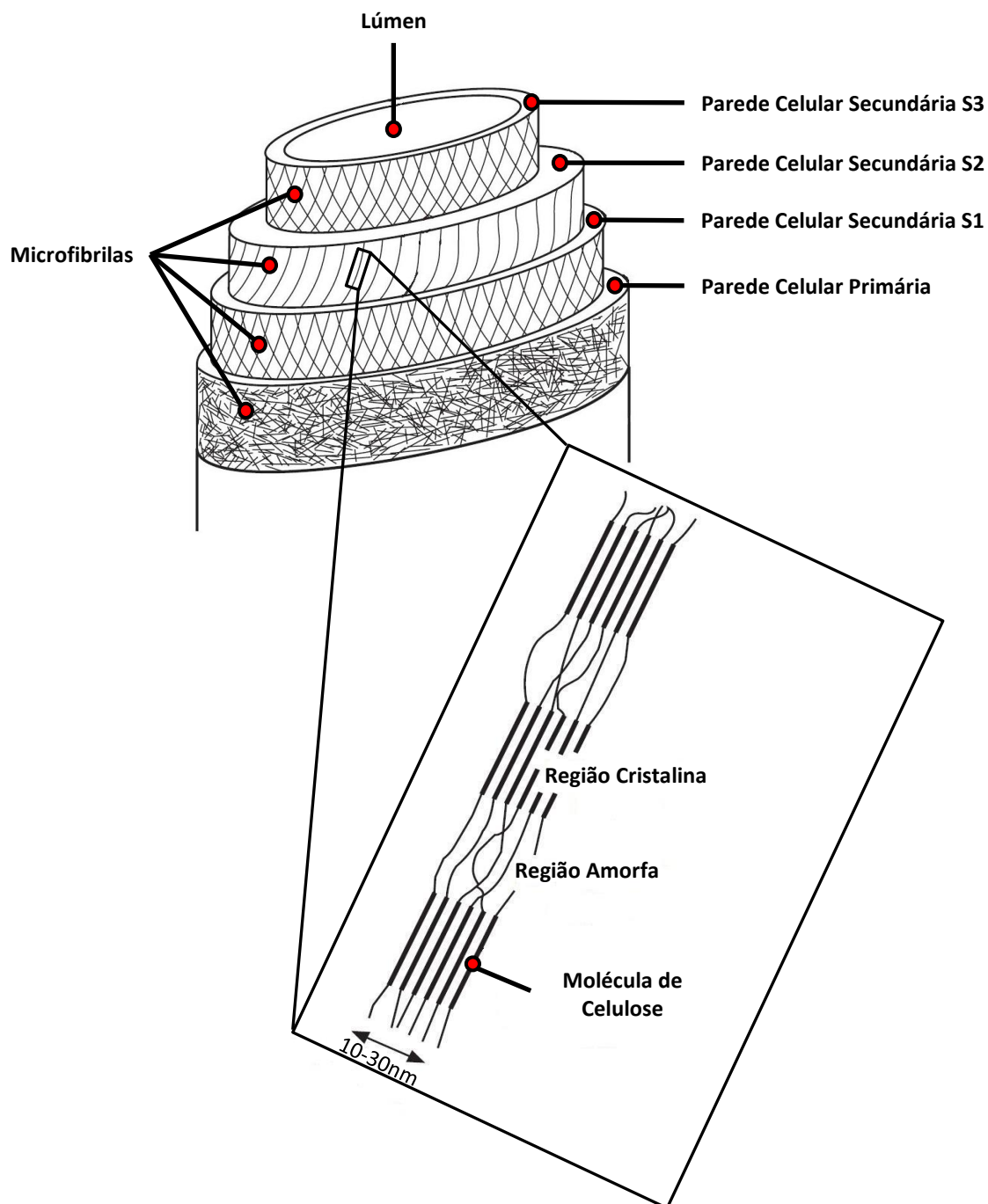


Figura 2.7 – Representação esquemática de uma fibra vegetal elementar/individual e pormenor da constituição de uma microfibrila (adaptado de [23])

Estas paredes são formadas pelas microfibrilas de celulose rígidas e semicristalinas, embebidas numa matriz amorfa que pode ser constituída por lenhina ou hemicelulose. As microfibrilas possuem diâmetros tipicamente entre os 10 e 30 nm e são constituídas por

cerca de 30 a 100 moléculas de celulose ligadas entre si em cadeia, providenciando assim a resistência mecânica às fibras [26].

De uma forma geral as fibras vegetais são constituídas maioritariamente por celulose, hemicelulose e lenhina. Para além dos três principais constituintes, algumas fibras vegetais podem também ser compostas por pectina, ceras e gorduras. O principal constituinte das fibras vegetais é a celulose. A celulose, principal responsável pelas propriedades mecânicas das fibras, é uma macromolécula linear constituída por milhares de monómeros de glicose ($C_6H_{11}O_5$) muito resistente a soluções alcalinas fortes, pouco resistente em meios ácidos e é moderadamente resistente a agentes oxidantes. A hemicelulose é muito hidrófila, solúvel em soluções alcalinas e pouco resistente a soluções ácidas. A lenhina, resistente a ácidos e pouco resistente a soluções alcalinas, é a responsável pela rigidez das plantas. Para além disso a lenhina apresenta uma estrutura amorfa e hidrofóbica [27].

A forma como os principais constituintes das fibras se unem assemelha-se, de certa forma, aos materiais compósitos produzidos pelo homem. As microfibrilas de celulose ligam-se às moléculas de hemicelulose da parede celular através de ligações de hidrogénio formando assim uma rede. Nesta rede, a hemicelulose actua como uma matriz que orienta as microfibrilas em determinadas direcções. A lenhina, por sua vez, actua como agente consolidador e provoca o aumento de rigidez da rede formada por celulose e hemicelulose [26].

Os diferentes teores e os diferentes arranjos, que o conjunto formado por celulose, hemicelulose e lenhina pode assumir, permitem fazer a distinção entre as várias paredes celulares. Assim, as paredes celulares dividem-se em duas secções: a parede celular primária e parede secundária. A parede celular primária é constituída por uma rede irregular de microfibrilas de celulose embebidas numa matriz de hemicelulose. Para além disso, a parede celular primária é porosa e é a responsável por algumas propriedades indesejáveis, como por exemplo a fraca molhabilidade [27]. A parede celular secundária subdivide-se em três camadas (S1, S2 e S3), sendo a camada S2 a mais importante e a que determina as propriedades das fibras [28]. No caso da parede celular secundária, as microfibrilas encontram-se aproximadamente paralelas entre si, e inclinadas relativamente ao eixo longitudinal da fibra. Este ângulo de orientação varia de planta para planta [26]. A Figura 2.8

mostra esquematicamente as paredes celulares bem como a orientação das microfibrilas numa fibra vegetal elementar.

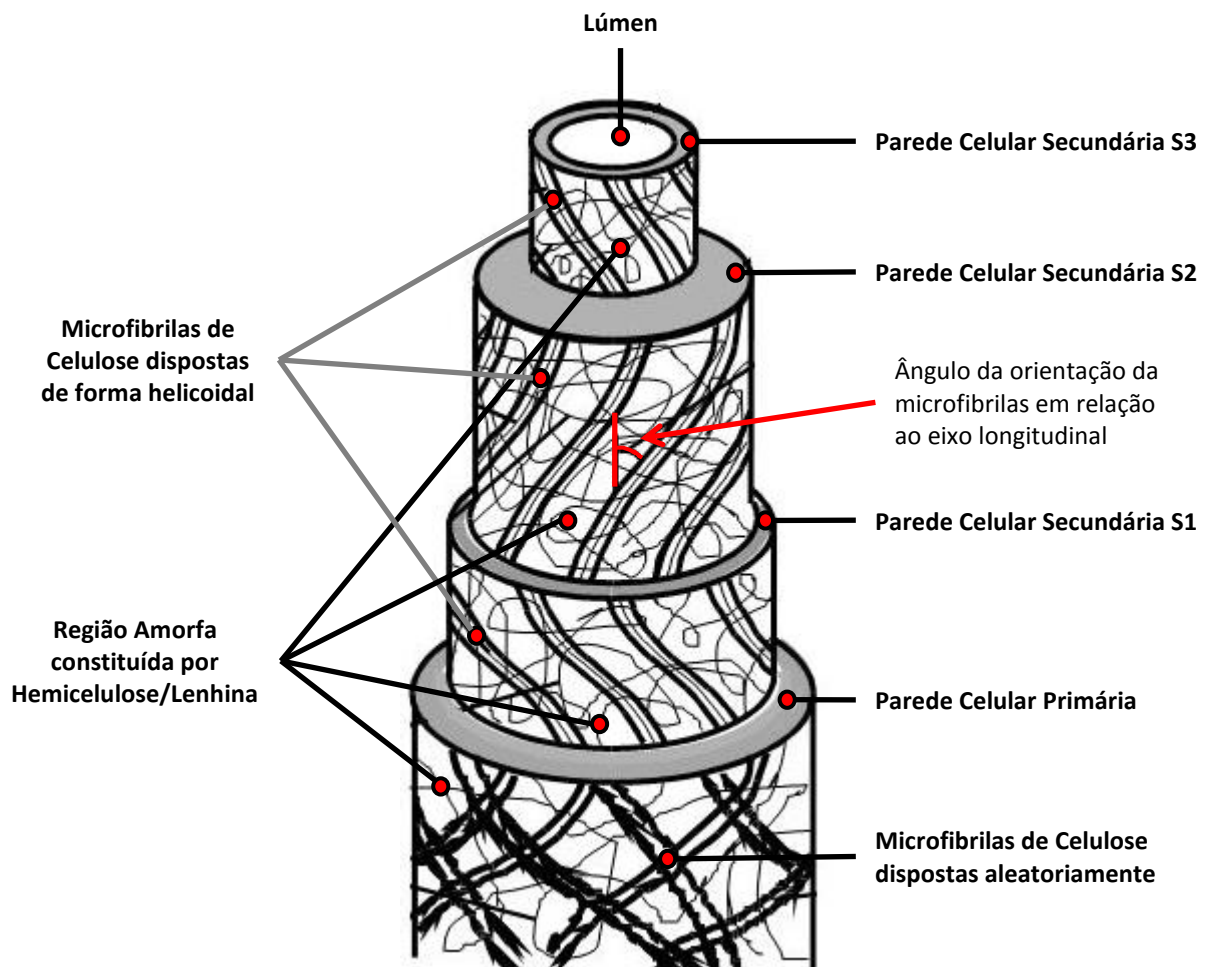


Figura 2.8 – Representação esquemática da constituição estrutural de uma fibra vegetal elementar (adaptado de [30])

As propriedades mecânicas das fibras estão intrinsecamente ligadas à quantidade de celulose e à orientação das microfibrilas de celulose. Em geral, a resistência à tracção e o módulo de elasticidade das fibras aumenta com o aumento da quantidade de celulose. O ângulo de orientação das microfibrilas em relação ao eixo longitudinal determina a rigidez das fibras. As fibras vegetais são mais dúcteis quanto maior for o ângulo de orientação das microfibrilas. Por outro lado, as fibras possuem maior rigidez, têm elevada resistência à tracção quando as microfibrilas estão orientadas quase paralelamente ao eixo longitudinal da fibra [27]. O ângulo de orientação das microfibrilas pode sofrer alterações quando as fibras absorvem água. A resistência à tracção de alguns tipos de fibras aumenta quando

estas se encontram molhadas uma vez que a dilatação promove um decréscimo do ângulo de orientação das microfibrilas [10].

A Tabela 2.5 [31], mostra a constituição química de algumas fibras naturais. Para cada tipo de fibra natural, é apresentada a percentagem dos quatro principais constituintes químicos.

Tabela 2.5 – Teores dos constituintes químicos de algumas fibras naturais de origem vegetal [31]

Origem	Fibras	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lenhina (%)	Pectina (%)
Semente	Algodão	82-96	2-6,4	0-5	<1-7
Fruto	Coco	43-46	0,25	45-46	3-4
Caule	Juta	51-84	12-20	5-13	0,2
	Linho	60-81	14-20,6	2,2-5	1-4
	Cânhamo	70-92	18-22	3-5	1
	Rami	68-76	13-15	0,6-1	2
	Kenaf	44-87	22	15-19	2
Folha	Sisal	43-78	10-24	4-12	0,8-2
	Abacá	61-64	21	12	0,8

Os valores apresentados na tabela anterior são meramente indicativos, uma vez que as propriedades químicas (assim como as físicas) das fibras naturais, dependem de vários factores. No subcapítulo Propriedades Físicas e Mecânicas das Fibras Naturais (2.3.2.7) da presente dissertação, serão descritas as principais razões pelas quais as fibras naturais apresentam elevada dispersão nas suas composições e propriedades.

2.3.2.3. Fibras extraídas de sementes das plantas

O exemplo mais comum de fibras oriundas dos pêlos epidérmicos da semente de uma planta são as fibras de algodão (Figura 2.9), sendo também este, o tipo de fibra natural mais

importante comercialmente e mais utilizado no mundo. Estas fibras são provenientes da semente da planta *Gossypium* [6, 19, 23, 27]. As fibras de algodão possuem uma elevada percentagem de celulose que pode chegar aos 95%. A secção transversal deste tipo de fibras tem a forma de um feijão, a sua superfície é lisa e ao longo do seu comprimento têm uma forma helicoidal [27]. O comprimento típico das fibras elementares de algodão varia aproximadamente entre os 22 e os 60 mm e o seu diâmetro está compreendido entre os 11 a 22 μm [23]. Em termos mecânicos, estas fibras possuem uma dureza e módulo de elasticidade inferiores às fibras de cânhamo, contudo, em relação a características como a extensão após rotura, recuperação elástica e flexibilidade, as fibras de algodão são superiores às fibras de cânhamo. O algodão é um material propenso à absorção de água, e a sua tenacidade é superior quando as fibras absorvem humidade. Em termos químicos, as fibras de algodão são resistentes a soluções alcalinas, mas degradam-se na presença de soluções ácidas. De referir que o algodão é um material facilmente inflamável e pouco resistente à degradação por microrganismos [27].

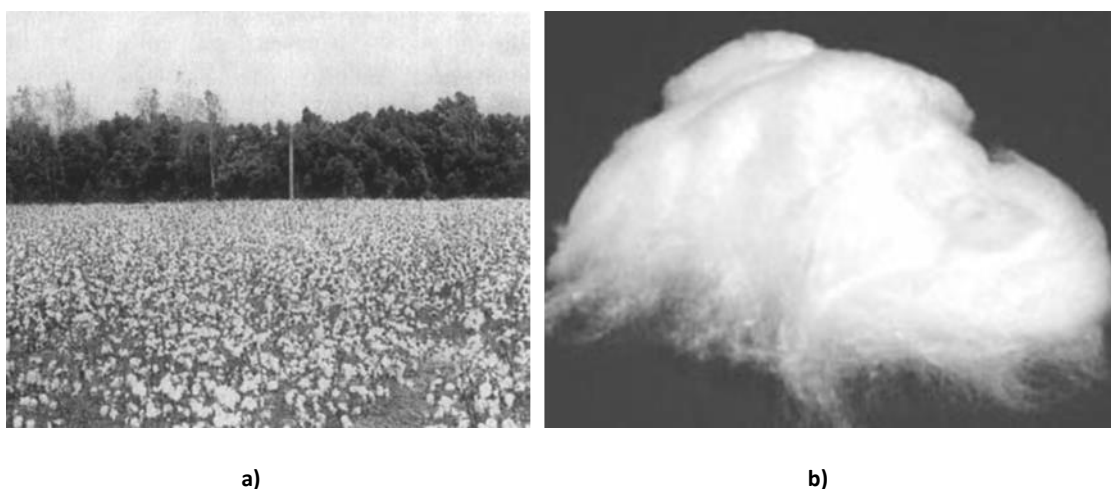


Figura 2.9 – a) Campo de algodão pronto para a colheita [32]; b) Fibras de algodão [29]

2.3.2.4. Fibras extraídas do fruto das plantas

O exemplo mais comum de fibras oriundas dos pêlos epidérmicos do fruto de uma planta são as fibras de coco (Figura 2.10), estas fibras são provenientes do fruto do coqueiro (*Cocos nucifera*), mais concretamente da casca do coco. Em termos químicos, este tipo de fibras possui elevado teor de lenhina e baixo teor de celulose, que na prática se traduz por uma

grande durabilidade, boa resiliência e baixa resistência mecânica das fibras de coco [27]. O comprimento típico dos feixes de fibras de coco está entre os 0,2 e os 0,4 m e o diâmetro varia de 150 a 250 μm . As fibras de coco possuem uma camada superficial de um composto alifático que contribui para uma boa ligação entre as fibras e a matriz [26]. Existe uma grande variedade de produtos tais como escovas, vassouras, cordas, fios, redes e tapetes que são produzidos utilizando as fibras de coco. Na indústria automóvel, este tipo de fibras é muito utilizado no enchimento dos assentos dos automóveis [6, 27].

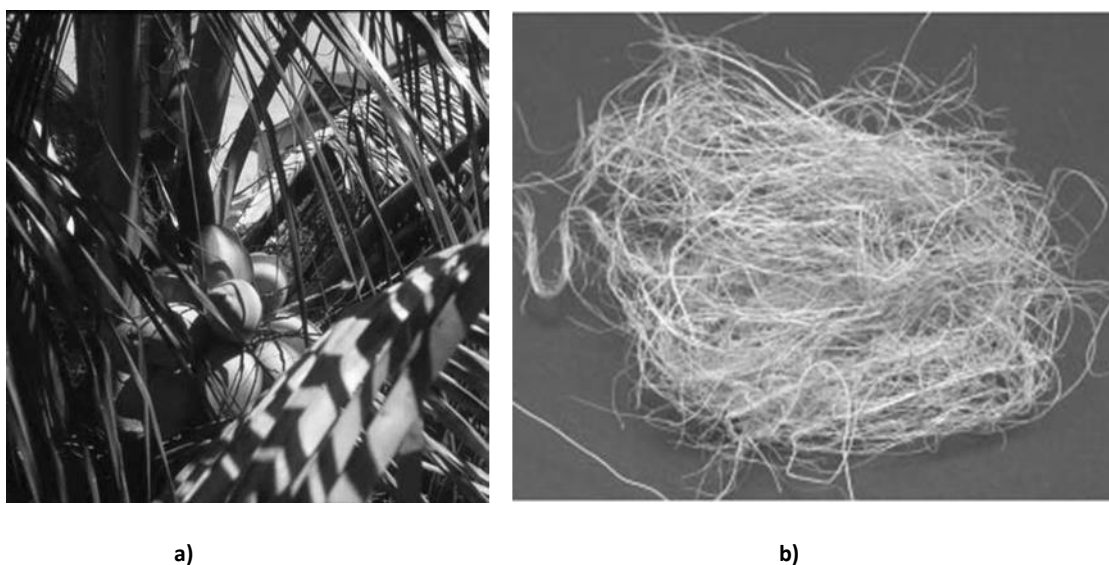


Figura 2.10 – a) Fotografia da planta *Cocos nucifera* com cocos [27]; b) Fibras de coco [29]

2.3.2.5. Fibras extraídas do caule das plantas

As fibras provenientes do caule são extraídas, maioritariamente, de plantas dicotiledóneas, mais propriamente da periferia exterior do cilindro central das plantas [10, 19, 26]. No interior do caule existe uma série de feixes de fibras, como é possível observar na Figura 2.11 [33]. Estes filamentos, constituídos por celulose e hemicelulose, estão ligados entre si por uma matriz que pode ser de pectina e/ou lenhina.

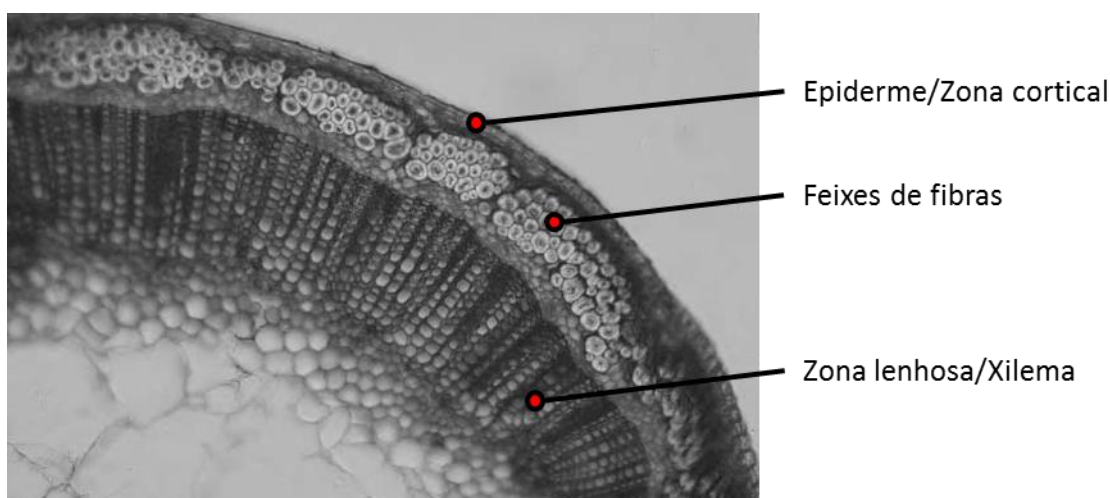


Figura 2.11 – Vista microscópica em corte, da secção transversal do caule de uma planta de linho (adaptado de [33])

Grande parte da pectina e/ou lenhina é removida através do tratamento de maceração que permite a separação dos feixes de fibras, dos restantes constituintes do caule [19]. A parte mais interna do caule está preenchida pelo xilema que transporta os sais minerais dissolvidos em água (seiva bruta). Estas plantas são cultivadas tipicamente em climas temperados (cânhamo e linho), climas subtropicais (juta) e climas tropicais (kenaf) [23].

As fibras de juta (Figura 2.12), provenientes da espécie *Corchorus*, são o tipo de fibras oriundas do caule com maior volume de produção [6] e apenas são superadas pelas fibras de algodão no que diz respeito ao volume de produção mundial de fibras naturais [23]. A juta é a fibra mais versátil, durável, natural, ecológica e disponível na natureza. Apesar de não serem muito utilizadas como tecidos de valor acrescentado, são largamente utilizadas para fabrico de cordas e tecidos grosseiros para a produção de sacos. As fibras elementares de juta possuem cerca de 10% da sua área da secção transversal, ocupada pelos lúmens [32]. A secção transversal possui uma forma poligonal de tamanho variável. O facto da dimensão transversal variar ao longo do comprimento da fibra (irregularidades na espessura da parede das células), influencia muito a sua resistência mecânica [27]. O comprimento típico dos feixes de fibras de juta varia entre 1,0 e 4,0 m e o diâmetro das fibras individuais varia entre 17 e 20 μm [26]. Em termos mecânicos as fibras de juta são resilientes, têm boa resistência à tracção, mas são frágeis e possuem uma baixa extensão após rotura (1,7%). O principal responsável pela fragilidade das fibras é o elevado teor em lenhina (aproximadamente 20%). A juta é pouco resistente a ácidos e à humidade e perde resistência à tracção quando

exposta à radiação solar. Apesar de pouco resistente à água, se as fibras se mantiverem secas, a juta tem uma durabilidade enorme. Comparativamente ao linho e ao cânhamo, as fibras de juta apresentam uma resistência mecânica inferior [27].

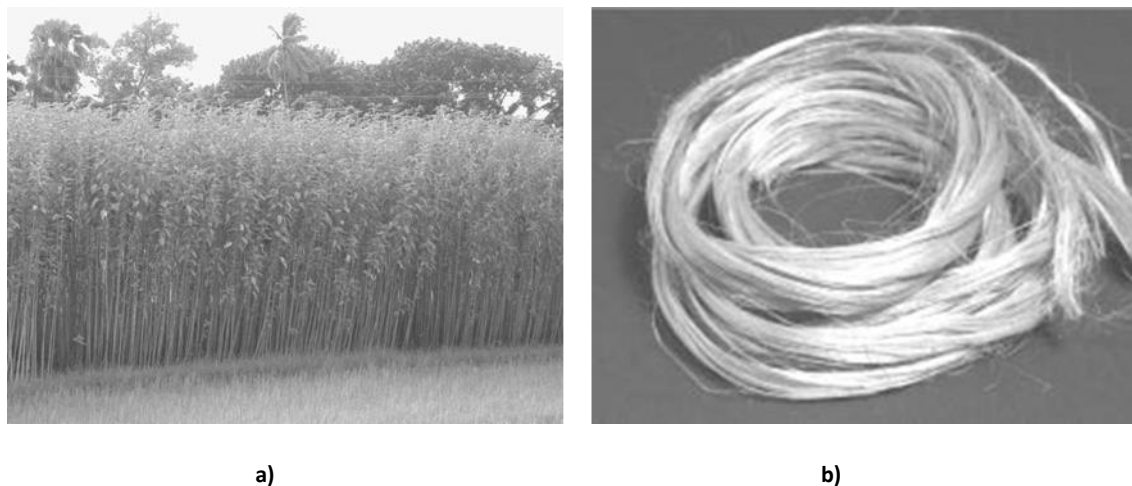


Figura 2.12 – a) Campo cultivado com as plantas da espécie *Corchorus* [34]; b) Fibras de juta [29]

As fibras de linho (Figura 2.13), provenientes da espécie *Linum usitatissimum*, são as fibras mais utilizadas para fabrico de tecidos de valor acrescentado. Ao longo de vários anos, estas fibras foram muito utilizadas e apreciadas em tecidos de vestuário. Actualmente, as fibras de linho são amplamente utilizadas na indústria automóvel [6]. Em termos mecânicos as fibras de linho são muito resistentes e flexíveis mas com pouca elasticidade. Tal como as fibras de juta, perdem resistência à tracção quando expostas à radiação solar. A sua temperatura de decomposição térmica situa-se acima dos 200 °C. O comprimento dos feixes destas fibras variam de 0,6 a 1,4 m e o seu diâmetro varia de 40 a 80 µm. Em termos químicos as fibras de linho possuem 70 a 75% de celulose, 15% de hemicelulose e 10 a 15% de pectina. São resistentes a soluções alcalinas e a ácidos fracos diluídos, mas degradam-se em contacto com ácidos concentrados. O elevado custo das fibras de linho em muito se deve ao grande número de processos necessários para a sua produção. Ainda assim, são muito utilizadas em materiais compósitos sujeitos a esforços de pouca intensidade, como por exemplo, alguns componentes dos habitáculos dos automóveis [27].



Figura 2.13 – a) Campo cultivado com linho (*Linum usitatissimum*) [27]; b) Fibras de linho [29]

As fibras de cânhamo (Figura 2.14), provenientes da espécie *Cannabis sativa*, são mais um exemplo de fibras naturais utilizadas em reforços de materiais poliméricos. O cultivo desta espécie de planta representa uma mais-valia em termos ecológicos. Um hectare de plantas da espécie *Cannabis sativa* absorve 2,5 toneladas de dióxidos de carbono da atmosfera, durante o seu período de crescimento [26]. Os feixes de fibras provenientes do caule desta espécie de planta, possuem comprimentos de 1,8 m ou superiores e as fibras elementares possuem um comprimento médio entre os 13 e 25 mm e, comparativamente às fibras de linho, são mais grosseiras. A sua secção transversal tem forma poligonal e ao longo do seu comprimento existem na superfície fissuras, articulações e outras irregularidades. Em termos de propriedades mecânicas têm boa resistência à tracção, alta tenacidade (20% maior que a das fibras de linho) mas baixa extensão após rotura. Para além disso são muito resistentes à humidade e degradam-se muito lentamente quando emersas em água. Estas boas propriedades fazem com que a indústria têxtil continue a fazer uso das fibras de cânhamo. Para além da indústria têxtil, estas fibras são usadas para produção de papéis especiais, materiais de construção, produtos alimentares e medicinais e também de combustível [27].

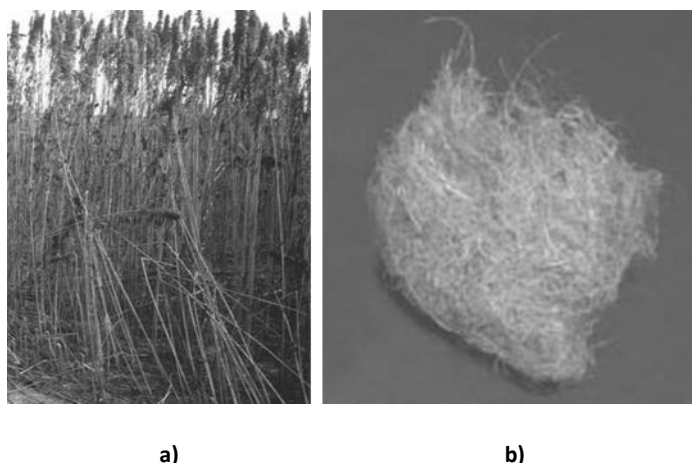


Figura 2.14 – a) Campo de plantas de cânhamo (*Cannabis sativa*) prontas para a colheita; b) fibras de cânhamo [29]

A espécie *Boehmeria nivea*, de onde são extraídas as fibras de rami (Figura 2.15), é muito cultivada no leste da Ásia em países como a Indonésia, Japão, China e Índia. Este tipo de fibras pode ser colhido da mesma planta até seis vezes por ano. As plantas crescem até cerca de 2,5 m e as suas fibras (feixe de fibras) são consideradas longas com cerca de 1,5 m ou mais. As fibras são extraídas da parte exterior do caule da planta e são consideradas umas das mais resistentes fibras têxteis. O diâmetro das fibras elementares varia entre os 10 e 25 μm . As fibras têm uma forma achatada mas irregular ao longo do seu comprimento e têm uma forma arredondada nas extremidades. Em termos mecânicos, estas fibras possuem excepcional resistência à tracção e esta resistência é melhorada na presença de humidade. Estas fibras são estáveis em meios alcalinos e resistentes a ácidos fracos. As excelentes propriedades fazem destas fibras um excelente reforço para os materiais compósitos [27].

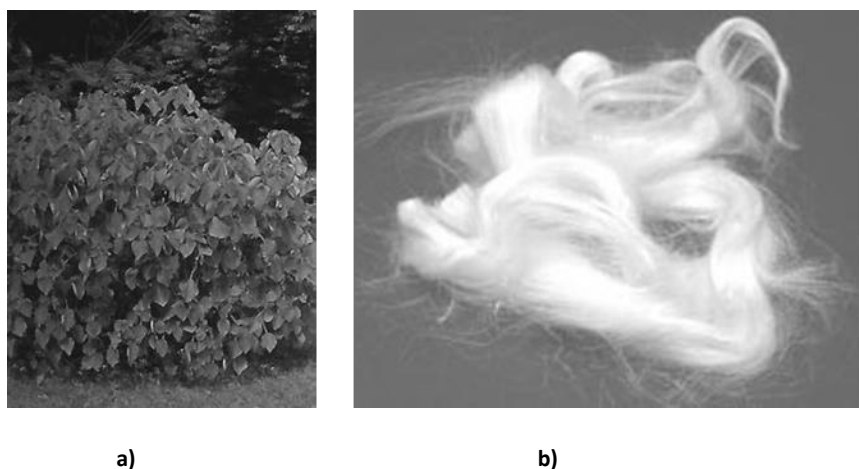


Figura 2.15 – a) Fotografia de uma planta de rami (*Boehmeria nivea*) [27]; b) Fibras de rami [29]

A espécie *Hibiscus cannabinus*, de onde são extraídas as fibras de kenaf (Figura 2.16), são cultivadas quer no continente Asiático quer no continente Africano. Esta espécie de planta é de crescimento rápido, uma vez que num intervalo de cinco a seis meses, estas plantas podem atingir a sua maturidade [26]. Existem duas variedades de fibras de kenaf: as fibras longas extraídas da zona cortical e as fibras curtas extraídas da zona lenhosa do caule. As fibras individuais de kenaf são curtas com dimensão a variar entre os 1,5 e 6 mm. A sua secção transversal é poligonal e a sua superfície é estriada e irregular. A dificuldade de processamento, bem como o facto de serem um material quebradiço e grosseiro são as suas principais desvantagens. Além disso, a sua resistência à tracção é comparável às fibras de juta de baixa qualidade e esta resistência piora caso exista humidade nas fibras. Como nota final sobre a planta de onde são extraídas as fibras de kenaf, importa referir que estas são as plantas que mais absorvem o dióxido de carbono. Uma tonelada de kenaf absorve uma tonelada e meia de dióxido de carbono da atmosfera. Este é um aspecto muito importante nos dias de hoje, dadas as actuais preocupações com o aquecimento global [27].

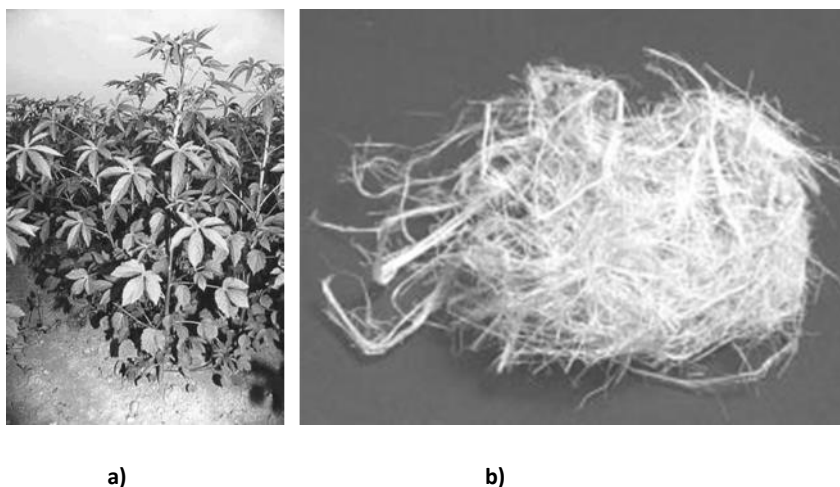


Figura 2.16 – a) Planta de kenaf [27]; b) Fibras de kenaf [29]

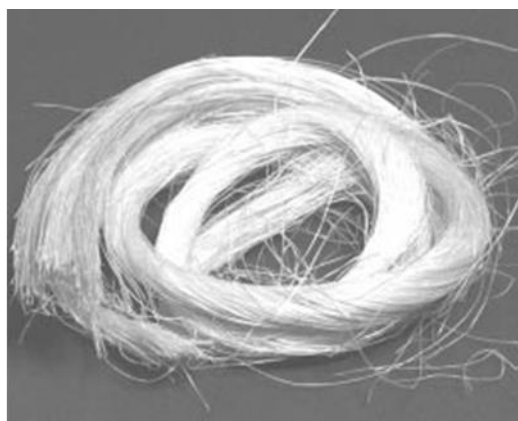
2.3.2.6. Fibras extraídas da folha das plantas

As fibras provenientes das folhas são extraídas de plantas monocotiledóneas, mais precisamente dos tecidos vasculares (xilema e floema) e têm como principais aplicações o fabrico de cordas e tecidos grosseiros [19].

As fibras de sisal (Figura 2.17), provenientes da espécie *Agave sisalana*, são um exemplo de fibras extraídas das folhas da planta. O comprimento típico dos feixes de fibras de sisal, varia entre os 0,6 e 1,5 m e o seu diâmetro varia entre os 100 e 300 μm . As propriedades mecânicas das fibras de sisal não são uniformes ao longo do seu comprimento. As fibras extraídas da parte central das folhas são aquelas que possuem melhores propriedades mecânicas, enquanto as fibras extraídas da zona adjacente à raiz das folhas, possuem módulo de elasticidade e resistência à tracção inferiores. As fibras extraídas da ponta das folhas possuem propriedades mecânicas intermédias entre as fibras da raiz e as fibras do centro das folhas. Em geral, as fibras de sisal são duras e a dureza bem como o módulo e a resistência à tracção diminuem com o aumento da temperatura. Estas fibras muito utilizadas como reforço de materiais compósitos, principalmente utilizadas no fabrico de componentes interiores de alguns automóveis [27].



a)



b)

Figura 2.17 – a) Planta de sisal [26]; b) Fibras de sisal [29]

As fibras de abacá (Figura 2.18), provenientes da espécie *Musa textilis*, são consideradas como sendo as fibras vegetais mais resistentes. O comprimento dos feixes de fibras de abacá varia entre os 2 a 4 m e o diâmetro das fibras individuais varia entre os 17 e 21 μm . Em termos mecânicos estas fibras são três vezes mais resistentes à tracção do que as fibras de algodão e cerca de duas vezes mais resistentes que as fibras de sisal. Para além disso, são também muito resistentes à degradação em água salgada. Para além da utilização como reforço de materiais poliméricos, estas fibras são muito usadas em produtos artesanais como bolsas, chinelos e também para produção de cordas [27].



a)



b)

Figura 2.18 – a) Fotografia de uma planta da espécie *Musa textilis*; b) Fibras de abacá de várias qualidades [27]

2.3.2.7. Propriedades Físicas e Mecânicas das Fibras Naturais

A Tabela 2.6 [1, 17, 23, 31], mostra as propriedades físicas de algumas fibras vegetais e das fibras de vidro E. Importa referir que, no caso das fibras naturais, as propriedades apresentadas são referentes às fibras elementares/individuais.

Tabela 2.6 – Propriedades físicas de algumas fibras elementares naturais e fibras de vidro E (adaptado de [1, 17, 23, 31])

Origem	Fibras	Comprimento das fibras elementares (mm)	Diâmetro das fibras elementares (μm)	Rácio entre comprimento e diâmetro das fibras elementares	Ângulo das microfibrilas, θ ($^\circ$)	Massa específica (kg/m^3)
Semente	Algodão	20-64	11,5-17	2752	20-30	1550
Fruto	Coco	0,9-1,2	16,2-19,5	64	39-49	1150-1250
Caule	Juta	1,9-3,2	15,9-20,7	157	8,1	1300-1500
	Linho	27-36	17,8-21,6	1258	5	1400-1500
	Cânhamo	8,3-14	17-23	549	6,2	1400-1500
	Rami	60-250	28,1-35	4639	-	1550
	Kenaf	2-2,7	17,7-21,9	119	-	1220-1400
Folha	Sisal	1,8-3,1	18,3-23,7	115	10-22	1300-1500
	Abacá	4,6-5,2	17-21,4	257	-	1500
Fibras de vidro E		Não aplicável	3-20	Não aplicável	Não aplicável	2600

Da observação da tabela anterior, facilmente se constata que as fibras de vidro E possuem uma massa específica muito superior a todas as fibras naturais apresentadas. Para além disso, é possível também observar que as fibras oriundas do caule possuem um menor ângulo das microfibrilas, enquanto as fibras de algodão e as de coco têm maior ângulo das microfibrilas. O comprimento das fibras naturais e o seu diâmetro, são as duas propriedades que mais variam nas diferentes fontes bibliográficas [29].

A Tabela 2.7 [1, 23, 31], mostra as propriedades mecânicas de algumas fibras vegetais. Além das referidas propriedades, são também apresentados os valores das propriedades específicas, determinadas através do quociente entre a propriedade (resistência à tracção ou módulo) e a densidade da respectiva fibra.

Tabela 2.7 – Propriedades Mecânicas de algumas fibras naturais de origem vegetal e das fibras de vidro E (adaptado de [1, 23, 31])

Origem	Fibras	Resistência à tracção (MPa)	Resistência à tracção específica (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo de elasticidade específico (GPa)	Alongamento na rotura (%)
Semente	Algodão	300-700	194-452	6-10	4-6,5	6-8
Fruto	Coco	106-175	92-152	6	5,2	15-40
Caule	Juta	200-450	140-320	20-55	14-39	2-3
	Linho	500-900	345-620	50-70	34-48	1,3-3,3
	Cânhamo	310-750	210-510	30-60	20-41	2-4
	Rami	915	590	23	15	3,7
	Kenaf	295-1191	-	22-60	-	-
Folha	Sisal	80-840	55-580	9-22	6-15	2-14
	Abacá	12	-	41	-	3,4
Fibras de vidro E		3400	1300	73	28	4,4

Com os dados das Tabelas 2.6 e 2.7, é possível observar qual o efeito que o ângulo das microfibrilas provoca nas propriedades mecânicas das fibras naturais. De uma forma geral,

observa-se que as fibras com menor ângulo das microfibrilas possuem mais resistência mecânica, maior módulo e menor percentagem de alongamento na rotura. A Figura 2.19 mostra, de uma forma simples e qualitativa, o comportamento mecânico que as fibras naturais apresentam para diferentes ângulos das microfibrilas.

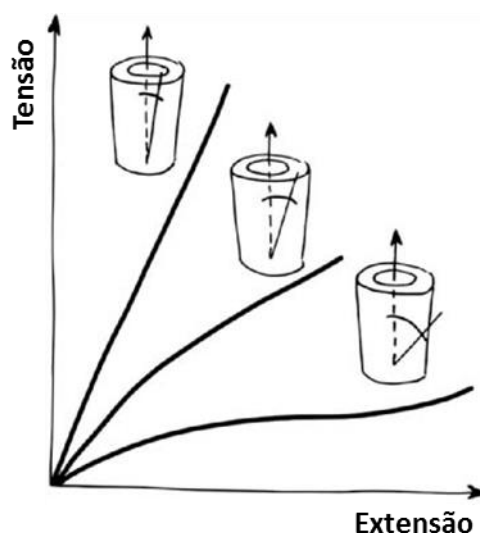


Figura 2.19 – Comportamento mecânico de fibras vegetais elementares com diferentes ângulos microfibrilares (adaptado de [34])

Geralmente, fibras como as de algodão e coco não são seleccionadas para reforço de materiais compósitos, uma vez que possuem propriedades mecânicas inferiores relativamente às fibras naturais oriundas do caule. Estas fibras apresentam um elevado ângulo das respectivas microfibrilas, facto esse que justifica as referidas baixas propriedades mecânicas. Por outro lado, as fibras de juta, sisal, linho e cânhamo, que possuem propriedades mecânicas específicas comparáveis às das fibras de vidro E, são amplamente estudadas e utilizadas no campo dos compósitos reforçados por fibras naturais [23].

Os valores apresentados nas tabelas anteriores (Tabelas 2.5, 2.6 e 2.7), são meramente indicativos uma vez que existem diversos factores que provocam uma grande dispersão das propriedades das fibras naturais. Esta variação, que também se verifica nas propriedades químicas das fibras naturais, pode ser explicada, não só, pelo facto de estarmos a lidar com um produto que é concebido pela natureza mas também por razões técnicas.

Diferentes fontes bibliográficas, sobre fibras naturais, apresentam normalmente propriedades físicas, mecânicas e químicas diferentes [33]. Isto acontece também pelo facto de serem utilizados diferentes métodos de ensaios. Mesmo para ensaios de fibras individuais, existem diferentes métodos de ensaio. Porém, o principal problema é a inconsistência da terminologia utilizada, isto é, o termo “fibra” é erroneamente utilizado para referir tanto um feixe de fibras, como para referir uma fibra individual [29, 34].

As propriedades de um feixe de fibras podem variar de forma considerável relativamente às propriedades de uma fibra elementar. Apesar da pectina e lenhina unirem as fibras elementares e assim darem forma e resistência mecânica ao feixe como um todo, as fibras individuais possuem uma resistência significativamente maior que os feixes de fibras [26]. Isto acontece porque quando um feixe é solicitado à tracção, a rotura ocorre nas camadas de pectina e lenhina [10]. Assim, quando não é descrito claramente se os resultados experimentais são referentes a fibras individuais ou feixes de fibras a interpretação e comparação dos resultados é dificultada.

Para além das razões técnicas até agora referidas, que promovem a grande dispersão de propriedades das fibras naturais, existem também os factores relacionados com a natureza das plantas, de onde se extraem as fibras vegetais. Diferentes resultados experimentais sobre um determinado tipo de fibras naturais podem ser explicados por factores como por exemplo: as fibras podem ter sido obtidas a partir de diferentes variedades da mesma espécie de plantas; os ensaios podem ter sido realizados em diferentes fases de maturidade da planta; as plantas provavelmente cresceram em solos diferentes e sob condições meteorológicas diferentes [33].

No presente subcapítulo (2.3.2) desta dissertação foram abordadas as principais características das fibras naturais mais utilizadas como reforço em materiais compósitos. No próximo subcapítulo (2.3.2.8), as fibras naturais de juta serão abordadas de uma forma mais aprofundada, uma vez que é este o tipo de fibra sobre o qual foram realizados os trabalhos experimentais da presente dissertação.

2.3.2.8. Fibras de juta

Neste subcapítulo, serão abordadas de uma forma mais aprofundada, as características e aplicações das fibras de juta e descrevem-se alguns dos mais importantes estudos desenvolvidos e investigações já realizadas, sobre as fibras de juta e sobre a sua utilização como reforço de materiais compósitos.

As fibras de juta, extraídas da planta *Corchorus*, são um produto agrícola muito importante e são utilizadas pelo homem desde os tempos pré-históricos. Esta planta, herbácea de crescimento anual, é cultivada em larga escala (exclusivamente para a extracção de fibras) em países como a Índia, Bangladesh, China, Tailândia e Brasil [27]. Apesar de existirem mais de trinta espécies da planta *Corchorus*, apenas duas espécies são cultivadas, *Corchorus capsularis*, conhecida como juta branca e *Corchorus olitorius*, conhecida como juta negra [33]. A Figura 2.20 mostra uma representação esquemática, onde é possível observar as principais diferenças morfológicas das duas espécies de plantas de juta.

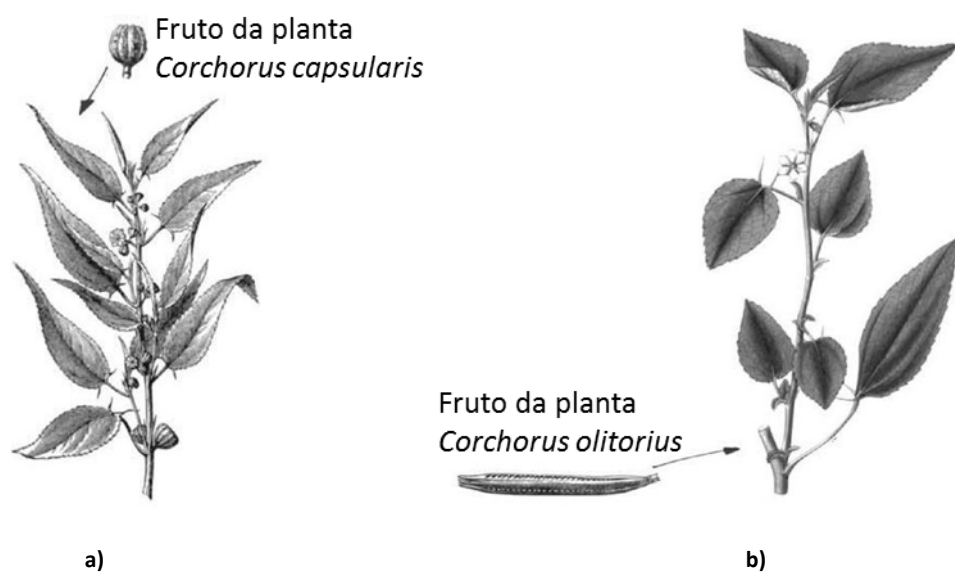


Figura 2.20 – Representação esquemática das duas espécies de planta de juta: a) *Corchorus capsularis*; b) *Corchorus olitorius* (adaptado de [34])

As plantas de juta (Figura 2.21) crescem em climas quentes (20-40 °C) e húmidos (70-80% humidade relativa), atingem os 2 a 3,5 metros de altura e o seu caule (não ramificado) possui um perímetro com cerca de 3 centímetros. Para além do ambiente quente e húmido,

é também exigida uma grande quantidade de precipitação uniformemente distribuída ao longo dos quatro meses de crescimento das plantas [23, 34].



Figura 2.21 – Plantas de juta [35]

O cultivo de juta (Figura 2.22) exige trabalho muito intensivo, mas em compensação requer relativamente pouca quantidade de fertilizantes, pesticidas e pode ser realizado em pequenas explorações. Para além disso, proporciona emprego em muitas áreas rurais [36]. O processo de cultivo da juta, inicia-se com a preparação do solo. O terreno é lavrado 3 a 4 vezes e, de seguida, são espalhadas as sementes, uniformemente por todo o terreno (cerca de 5 quilogramas de sementes por hectare). A sementeira é realizada normalmente no mês de Abril. Após 4 meses, cerca de 110 a 120 dias, as plantas de juta estão prontas para a colheita. O momento certo para a colheita é determinante para garantir a qualidade das fibras. Uma colheita antecipada, tem como consequência a extracção de fibras fracas e se a planta amadurecer excessivamente, as fibras tornam-se ásperas, grosseiras e difíceis de extrair da planta [32, 34].



a)



b)

Figura 2.22 – Cultivo de juta: a) Sementeira da juta; b) Colheita das plantas de juta [35]

A extracção das fibras de juta é feita através do processo de maceração. Este processo consiste na separação das fibras dos restantes constituintes do caule, através da dissolução e degradação da pectina e outras substâncias gordurentas [29]. Maceração química e maceração biológica, são os dois métodos possíveis para levar a cabo a extracção das fibras. Contudo, o elevado custo da maceração química faz com que este método não seja praticado em larga escala [34]. Para levar a cabo o processo de maceração biológica (método de extracção de fibras de juta mais utilizado), as plantas colhidas são inicialmente amarradas em feixes e de seguida estes feixes, são imersos em água (Figura 2.23). A acção combinada da água, de microrganismos e enzimas resulta no amolecimento da planta e na dissolução da pectina e outras substâncias, tornando a extracção das fibras mais fácil [32, 36]. O processo demora entre 15 a 20 dias e depende de alguns factores tais como [34, 36]:

- ✓ Natureza e volume de água: água doce, limpa e em movimento lento são as condições ideais. O volume de água deverá ser suficiente para que os feixes possam flutuar sem tocar no fundo.
- ✓ Temperatura da água: a temperatura ideal é de 34 °C. A esta temperatura, a maceração é completa em 15 dias. Quanto maior for a temperatura, mais rápido o processo se completa e quanto menor for a temperatura, mais lenta é a maceração.
- ✓ pH da água: o valor óptimo de pH para a maceração situa-se ente os 6,5 e 7,0. Contudo, é normal que as águas onde se realiza o processo tenham um pH ente 6,0 e 8,0.
- ✓ Idade e tamanho das plantas: plantas que tenham sido colhidas demasiado tarde necessitam de mais tempo para levar a cabo a maceração.



Figura 2.23 – Processo de maceração: a) Plantas colhidas amarradas em feixes; b) feixes de juta imersos em água [35]

No final da maceração procede-se à separação manual, lavagem e secagem dos feixes de fibras (Figura 2.24), num processo que demora entre 2 a 3 dias [36].

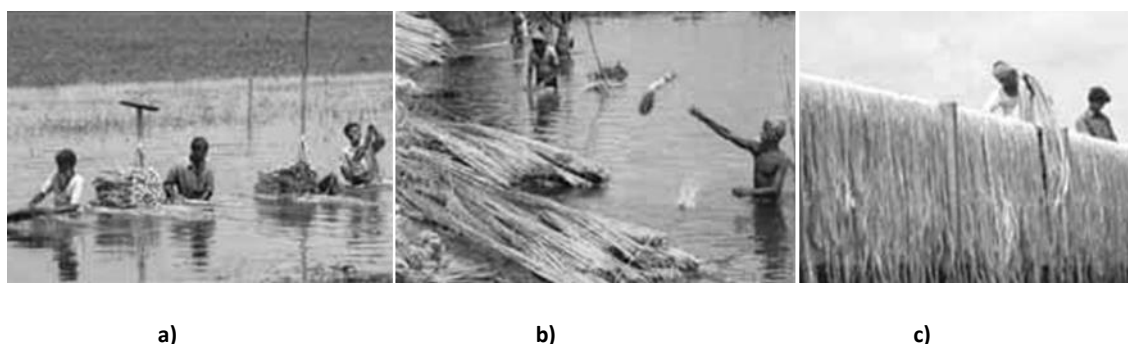


Figura 2.24 – a) Separação manual das fibras; b) Lavagem das fibras; c) Secagem das fibras [35]

Finalizada a secagem, os feixes de fibras são classificados tendo em conta factores como: cor, comprimento, espessura dos feixes, brilho, limpeza e defeitos. Os feixes de fibras extraídos, que são utilizados na maioria dos produtos, possuem normalmente, entre 8 e 25 fibras elementares, espessura igual ou superior a 200 μm e o seu comprimento poderá ser igual ao comprimento total do caule da planta [34]. A Figura 2.25 [32] mostra parte da secção transversal de um feixe de fibras de juta.

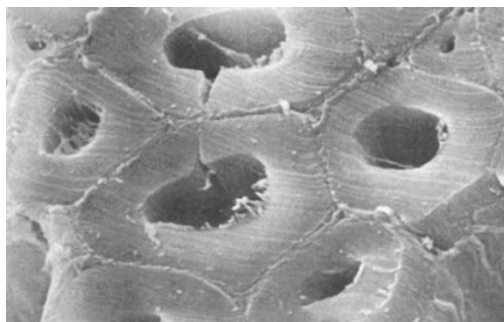


Figura 2.25 – Parte da secção transversal de um feixe de fibras de juta, constituído por várias fibras elementares (ampliação de 7600 vezes) [32]

Posteriormente, as fibras são amarradas em fardos e transportadas para as fábricas para o fabrico de fios através do processo de fiação, e para o fabrico de tecidos, através do processo de tecelagem. A fiação é o processo que permite, através da aplicação de torção, transformar as fibras de juta em fios contínuos com diâmetro e massa por unidade de comprimento, previamente estabelecidos. Depois de obtidos os fios, é realizado o processo

de tecelagem que permite o fabrico de tecidos. Um tecido é formado por dois sistemas de fios denominados teia e trama. Os fios da teia estão posicionados paralelamente ao longo do comprimento do tecido, enquanto os fios da trama, entrelaçados perpendicularmente com a teia, posicionam-se paralelamente à largura do tecido [34]. A Figura 2.26 [33, 34], mostra alguns equipamentos utilizados nos processos de fiação e tecelagem.



Figura 2.26 – a) Equipamento de fiação [34]; b) Equipamento de tecelagem [33]

















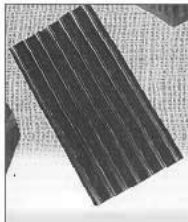
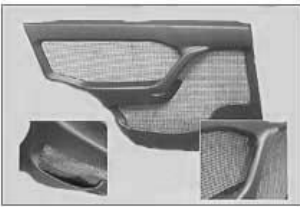
Existem diferentes aplicações, em áreas bastante distintas, que utilizam as fibras de juta como matéria-prima para fabrico de produtos finais. Tradicionalmente, as fibras de juta eram utilizadas em larga escala para produção de sacos de sarapilheira (transporte de produtos agrícolas), fios, cordas e tapetes. Contudo, foi realizado um esforço no sentido de promover a utilização em massa da juta como matéria-prima para fabrico de produtos de valor acrescentado a preços competitivos. As fibras de juta são utilizadas em áreas como [34, 36]:

- ✓ Têxteis para o lar: características como o bom isolamento térmico, acústico e protecção ultravioleta fazem das fibras de juta uma opção inteligente para a decoração de uma casa. O fabrico de produtos que combinam as fibras de juta com fibras de algodão, permite fabricar bens, como por exemplo toalhas de mesa, cortinas, colchas, capas para almofadas e sofás, cobertores, tapetes e revestimento de pavimentos.
- ✓ Malas: malas e sacos para diferentes utilizações, podem ser produzidos a partir de fibras de juta. Sacos de praia, mochilas para a escola, bolsas de senhora, sacos de viagem, sacos de compras são os exemplos mais comuns.

- ✓ Geotêxteis: consolidação de vegetação, reforço e protecção das margens dos rios, recuperação de terrenos, controlo da erosão, e construção de estradas estão entre as aplicações mais importantes das fibras de juta. Existe na indústria geotêxtil um enorme potencial para a aplicação das fibras de juta, uma vez que estas apresentam propriedades como a boa capacidade de absorção e retenção de humidade, maleabilidade e flexibilidade.
- ✓ Têxteis técnicos: Algumas propriedades (por vezes conseguidas após tratamentos químicos apropriados) como boa tenacidade, alta resistência à abrasão, relativa resistência a temperaturas elevadas (temperatura de ignição de 193 °C [37]), baixa densidade, durabilidade e possibilidade de serem lavadas, fazem das fibras de juta um material atractivo para sectores específicos, onde os parâmetros de performance têm maior peso que o aspecto estético. As fibras de juta são utilizadas para a produção de tecidos para roupa protectora (contra fogo e calor) [33], tecidos para a indústria automóvel, e como reforço de materiais compósitos.
- ✓ Materiais compósitos: As fibras de juta possuem potencial suficiente para competir com as fibras de vidro no reforço de materiais compósitos. Os compósitos reforçados por fibras de juta são utilizados por exemplo na indústria de embalagens para o fabrico de caixas de grandes dimensões que se destinam ao transporte e armazenamento de produtos agrícolas. Outro exemplo é a indústria da construção, que utiliza compósitos reforçados com fibras de juta para o fabrico de telhas onduladas e caixilharia de janelas e portas. O baixo custo, a baixa densidade e o facto de serem recicláveis e biodegradáveis, fazem das fibras de juta um material muito atractivo para o reforço de materiais compósitos para a indústria automóvel. Exemplos disso são alguns painéis de portas, painéis posteriores de assentos e tabliers que são produzidos em material polimérico reforçado com fibras de juta.

A Tabela 2.8 mostra, em resumo, as principais aplicações das fibras de juta.

Tabela 2.8 – Principais aplicações das fibras de juta (adaptado de [35])

	Sacos	Cordas	Fios
Produtos tradicionais			
Têxteis para o lar	Cortinas 	Capas de almofada 	Revestimento de pavimento 
Malas	Malas de senhora 	Sacos de viagem 	Sacos de praia 
Geotêxteis	Diques de protecção 	Recuperação de terrenos 	Construção de estradas 
Têxteis técnicos	Luvas de protecção 	Sapatos de protecção 	Avental de protecção 
Materiais compósitos	Caixilharia de portas 	Telhas onduladas 	Painel da porta de um automóvel 

Na verdade, as fibras de juta são um dos tipos de fibras naturais mais importantes no reforço de materiais compósitos [27]. Existe um grande interesse em aproveitar as qualidades técnicas aliadas aos benefícios ecológicos que as fibras de juta proporcionam quando utilizadas como material de reforço. Até ao momento, diversos estudos foram já realizados com o intuito de caracterizar mecanicamente, diferentes matrizes reforçadas por fibras de juta. Nos parágrafos seguintes descrevem-se, em resumo, alguns desses estudos onde as propriedades mecânicas de compósitos com diferentes tipos de matrizes, diferentes orientações de reforço e os efeitos do tratamento alcalino aplicado à juta, são os temas principais.

Compósitos de Juta e Poliéster

Um estudo [7] realizado com o intuito de compreender as propriedades mecânicas de compósitos unidireccionais reforçados com fibras de juta, revelou que existe uma boa adesão entre o reforço e a matriz de poliéster para valores da fracção volúmica de fibras inferiores a 0,6. Para valores superiores a este, a resina não tem capacidade de impregnar completamente as fibras. Para além disso, o mesmo estudo revelou ainda que é possível produzir compósitos com fibras de juta sem alterar os procedimentos habitualmente utilizados na produção de compósitos reforçados com fibras de vidro. Neste trabalho, mostrou-se ainda que as fibras de juta possuem um maior módulo de elasticidade específico (42,7 GPa) em comparação com as fibras de vidro (28,8 GPa).

Num outro estudo, foi analisada a influência da orientação das fibras de juta em compósitos de matriz de poliéster insaturado [38]. Os autores prepararam dois tipos de compósitos através de moldação por compressão, um com fibras longas (200 mm) orientadas unidireccionalmente e o outro com fibras curtas (10 mm) orientadas aleatoriamente. Tal como seria espectável, os compósitos com fibras alinhadas testados longitudinalmente revelaram propriedades melhores que os compósitos com fibras distribuídas aleatoriamente. Na Figura 2.27, é possível observar não só a influência da orientação das fibras na resistência mecânica como também, o efeito da fracção mássica de fibras. Apesar dos compósitos com fibras curtas apresentarem propriedades mecânicas inferiores, verificou-se ainda assim que a incorporação de fibras providenciou uma melhoria nas propriedades mecânicas, comparativamente ao polímero não reforçado.

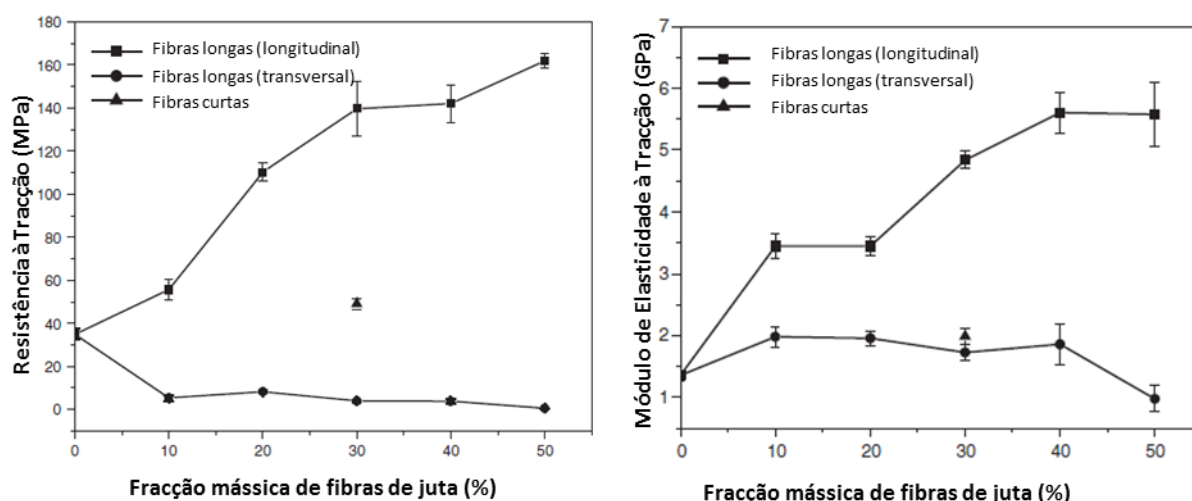


Figura 2.27 – Efeitos da orientação e fracção mássica de fibras nas propriedades mecânicas de compósitos de poliéster e juta (adaptado de [38])

Foram já desenvolvidos vários estudos sobre os efeitos do tratamento alcalino das fibras de juta. Geralmente, o tratamento alcalino com hidróxido de sódio (NaOH) incrementa a resistência mecânica de compósitos reforçados por fibras naturais [5, 27]. Quando as fibras naturais são imersas numa solução aquosa de hidróxido de sódio durante um determinado período de tempo e a uma dada temperatura, grande parte da hemicelulose, lenhina e outras substâncias são removidas da superfície das fibras. A morfologia superficial das fibras é alterada, tornando-se mais rugosa e consequentemente, aumenta também a área superficial das fibras. A adesão mecânica é assim melhorada. Para além disso, o tratamento alcalino promove também uma maior compatibilização química entre fibras e a matriz. Em resumo, o tratamento das fibras naturais com hidróxido de sódio resulta no incremento da molhabilidade, na melhoria da adesão e compatibilidade entre as fibras e a matriz [39].

Uma análise realizada com o objectivo de comparar o comportamento mecânico de compósitos de poliéster reforçado com 37% de volume de fibras de juta não tratadas e sujeitas a diferentes tratamentos, revelou que o tratamento alcalino melhorou as propriedades à tracção e à flexão, comparativamente aos compósitos reforçados com fibras não tratadas. Neste estudo, as fibras de juta foram imersas numa solução aquosa de hidróxido de sódio com uma concentração de 5% em volume, durante 1 hora, à temperatura ambiente. Os ensaios de tracção realizados, revelaram um aumento da resistência à tracção de 8,6% e um aumento do módulo de 6,7% para os compósitos reforçados com fibras

tratadas. Relativamente aos ensaios de flexão, os resultados mostraram que existiu um incremento de 9,1% na resistência à flexão e um aumento de 9,7% do módulo dos compósitos reforçados com fibras sujeitas ao tratamento alcalino. Como nota final, importa referir que apesar das melhorias nas propriedades dos compósitos, os ensaios de tracção realizados aos fios de juta, revelaram um decréscimo de cerca de 10,8% na resistência mecânica dos fios após a realização do tratamento alcalino [40].

A viabilidade da utilização de compósitos de poliéster reforçado com fibras de juta para o fabrico de silos cilíndricos verticais foi já analisada [41]. Nesse trabalho, testou-se a resistência ao impacto, à pressão hidrostática e a resistência à compressão de compósitos tubulares com teores mássicos de fibras entre 22 e 31%. Os resultados obtidos, permitiram concluir que a construção de silos verticais utilizando poliéster reforçado com tecido de juta é uma alternativa viável em termos mecânicos, relativamente aos tradicionais silos metálicos de grande porte.

Compósitos de Juta e Epóxido

As propriedades físicas e mecânicas de compósitos de epóxido, reforçados por tecido de juta bidireccional, obtidos por moldação manual foram analisadas num estudo [42]. Esse estudo mostrou que à medida que o teor volúmico de fibras aumenta, entre os 12 e os 48%, aumenta também a resistência à tracção, a resistência ao impacto e a dureza do compósito. A quantidade de vazios no interior do compósito (resultantes do aprisionamento de bolhas de ar ou absorção de humidade durante o processo de fabrico), foi também analisada e verificou-se que à medida que o teor volúmico de fibras aumenta, a quantidade de vazios diminui. Para além disso, mostrou-se que propriedades como a resistência à flexão e a resistência ao corte interlaminar, são bastante influenciadas pelo teor de vazios, isto é, uma maior quantidade de vazios diminui a resistência à flexão dos compósitos.

Utilizando o processo de infusão de resina, foram fabricados compósitos de epóxido reforçado com tecido de juta, com o objectivo de analisar o comportamento mecânico na direcção dos fios da trama e na direcção dos fios da teia. A resistência mecânica dos compósitos testados na direcção dos fios da trama e da teia foi de 61 MPa e 43 MPa respectivamente. Nesse estudo concluiu-se que, o número de fios, bem como o diâmetro dos fios são os principais factores que influenciam a resistência mecânica [43].

Com o objectivo de analisar o comportamento mecânico de compósitos com diferentes orientações de reforço de juta, foram analisados num estudo [44], laminados com as seguintes sequências de empilhamento: (0/0/0/0), (0/+45°/-45°/0) e (0/90°/90°/0). Os laminados, obtidos através de infusão de resina de epóxico, com 25% de volume de fibras, foram sujeitos a ensaios de tracção e flexão em três pontos, e os resultados experimentais foram comparados com os resultados teoricamente esperados pela aplicação da lei das misturas. A tensão de rotura das fibras, parâmetro essencial para a aplicação da lei das misturas, foi determinada experimentalmente através do ensaio de tracção de monofilamentos de juta. Neste ensaio, verificou-se que a resistência à tracção das fibras de juta, é muito influenciada pelo comprimento dos monofilamentos, isto porque a probabilidade de existirem defeitos é tanto maior, quanto maior for o comprimento dos monofilamentos. Por outro lado, o módulo de elasticidade das fibras é independente do comprimento das fibras, dos seus defeitos e da deformação do sistema que tracciona as fibras. A Tabela 2.9, mostra os resultados obtidos nos ensaios de tracção e flexão realizados aos compósitos produzidos no referido estudo.

Tabela 2.9 – Propriedades mecânicas de laminados de epóxico, reforçados por juta, com diferentes orientações do reforço (adaptado de [44])

	Tipo de laminado	Tensão de rotura à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento na rotura (%)
Ensaio de tracção	0-0	112,69 ± 18,31	14,59±2,28	0,82 ± 0,17
	0-45	64,31 ± 13,18	10,46±0,56	0,64 ± 0,15
	0-90	42,54 ± 6,42	11,13±1,47	0,43 ± 0,05
Ensaio de flexão em 3 pontos	0-0	138,94 ± 18,62	10,31±3,95	1,94 ± 0,70
	0-45	149,71 ± 20,19	9,88±2,13	1,99 ± 0,43
	0-90	106,27 ± 20,44	7,61±1,95	1,98 ± 0,45

De acordo com a lei das misturas, a tensão de rotura prevista para os laminados, com fibras orientadas a 0° seria de 272,47 MPa. Contudo, os resultados experimentais evidenciaram uma tensão de rotura à tracção de 112,69 MPa e uma tensão de rotura à flexão de 138,9

MPa. A razão desta diferença é atribuída, pelos autores, à falta de eficiência do reforço devido à presença de defeitos de várias geometrias e de diferentes concentrações nas fibras de juta.

Um outro estudo realizado com o objectivo de comparar a influência do tratamento alcalino no processamento e nas propriedades finais de compósitos reforçados por fibras de juta, mostrou que o tratamento, durante 24 horas, com uma solução aquosa de hidróxido de sódio com uma concentração de 5% em volume, conduziu a uma degradação das propriedades das fibras elementares. Enquanto os feixes de fibras não tratadas possuíam uma resistência de 505 ± 156 MPa e um módulo de 30 ± 15 GPa, após o tratamento, as fibras apresentaram uma resistência de 326 ± 150 MPa e um módulo de $12,2 \pm 5,2$ GPa. Relativamente ao processamento, o mesmo estudo revelou que o processo por infusão de resina de epóxido vinil éster é mais moroso para as fibras tratadas, uma vez que após o tratamento alcalino, as fibras possuem uma superfície mais rugosa e uma maior área superficial exposta. Desta forma, existe uma maior resistência ao fluxo de resina durante o processo de infusão. As propriedades mecânicas dos compósitos produzidos no referido estudo, revelaram que o tratamento alcalino influenciou negativamente a resistência à flexão e o módulo de elasticidade à flexão, como mostra a Tabela 2.10 [45]. Uma análise ao microscópio electrónico revelou ainda que o tratamento aplicado às fibras neste estudo foi bastante severo e provocou danos nas paredes celulares das fibras de juta. Na microscopia realizada, foi também possível observar que as fibras não tratadas possuíam lúmens abertos e muitos desses lúmens encontravam-se preenchidos de resina, facto que prova a possibilidade de a resina fluir para o interior das fibras elementares.

Tabela 2.10 – Propriedades mecânicas à flexão de compósitos com fibras de juta tratadas e não tratadas [45]

Propriedade	Resina de epóxido vinil éster + 30 % de volume de fibras de juta em tecido bidireccional	
	Fibras tratadas	Fibras não tratadas
Módulo de elasticidade à flexão (GPa)	$5,5 \pm 0,2$	$6,6 \pm 0,5$
Resistência à flexão (MPa)	83 ± 6	103 ± 6

Compósitos de matriz termoplástica, reforçados por fibras de juta

Normalmente, existe uma fraca adesão entre fibras de natureza hidrófila (como as de juta) e matrizes hidrofóbicas (como o polipropileno). Quando sujeitas a tratamentos alcalinos, as fibras de juta podem promover a ligação na interface fibra/matriz. Um estudo realizado com o objectivo de analisar as propriedades mecânicas de compósitos (obtidos por compressão a quente) de polipropileno reforçado com fibras juta tratadas em comparação com fibras não tratadas, mostrou que não existem alterações significativas na resistência mecânica dos compósitos, quando as fibras são sujeitas ao tratamento alcalino com hidróxido de sódio. O excesso de tempo no tratamento alcalino das fibras pode ter conduzido, segundo os autores, à dissolução excessiva de hemicelulose tornando as fibras mais frágeis. Se por um lado, a adesão entre as fibras e a matriz foi melhorada, por outro lado, o facto de as fibras perderem qualidades após o tratamento, resultou em alterações insignificantes na resistência mecânica dos compósitos em estudo [5]. Para além disso, nesse mesmo estudo, foram analisadas ao microscópio electrónico as zonas de rotura dos compósitos e concluiu-se que a fractura é essencialmente frágil.

Um estudo realizado com o objectivo de comparar as propriedades mecânicas de compósitos com matriz de polipropileno (PP) e utilizando diferentes reforços, mostrou que existem diferenças significativas entre reforços fibrosos de vidro e de juta. Foram produzidos, através de moldação por compressão a quente, compósitos reforçados com tecido de juta e compósitos reforçados com tecido de fibras de vidro, ambos com uma fracção mássica de 50% de fibras. Os resultados dos ensaios de tracção e flexão realizados com estes dois tipos de compósitos e à matriz de polipropileno, estão apresentados na Tabela 2.11 [46]. Da observação da referida tabela, facilmente se conclui que as propriedades mecânicas melhoram significativamente com o reforço de juta, comparativamente ao PP não reforçado. Apesar das propriedades do PP reforçado com fibras de vidro E serem bastante superiores, comparativamente com as propriedades dos compósitos de juta, é importante salientar que a juta possui uma densidade significativamente menor que o vidro e por isso, a resistência mecânica específica, assim como o módulo específico deste dois tipo de compósitos, podem se equiparados.

Tabela 2.11 – Propriedades mecânicas da matriz de PP e dos compósitos de PP reforçados com juta e vidro E (adaptado de [46])

Material	Propriedades à tracção			Propriedades à Flexão	
	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade à tracção (GPa)	Alongamento na rotura (%)	Resistência à flexão (MPa)	Módulo de elasticidade à flexão (GPa)
PP	21 ± 2	0,53 ± 0,14	378 ± 35	27 ± 1,4	1,98 ± 0,11
PP + Fibras Juta	48 ± 2,4	2,50 ± 0,20	12 ± 3	56 ± 2,6	4,50 ± 0,14
PP + Fibras de vidro E	85 ± 3,5	7,00 ± 0,10	14 ± 4	85 ± 4	12,00 ± 0,12

Utilizando também uma matriz termoplástica foi analisada, num outro trabalho [47], a resistência à tracção de compósitos de PVC, reforçados com tecido de juta com diferentes fracções mássicas de fibras. Os autores deste estudo mostraram que os compósitos obtidos através de moldação por compressão apresentaram melhores propriedades para uma fracção mássica de fibras de 40%, graças a uma melhor distribuição e transferência da carga aplicada. Para os compósitos com 40% de fibras de juta (em massa), a resistência à tracção e a resistência à flexão aumentaram 77% e 46%, respectivamente, comparativamente ao PVC não reforçado. Os valores das propriedades mecânicas, dos compósitos fabricados no referido estudo, estão indicados na Tabela 2.12.

Tabela 2.12 – Propriedades mecânicas de compósitos de PVC reforçados com fibras de juta (adaptado de [47])

Material	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade à tracção (GPa)	Resistência à flexão (MPa)	Módulo de elasticidade à flexão (GPa)
PVC + 40% de fibras de juta (em peso)	59,9	1,3	62,6	3,2

Num estudo realizado com o objectivo de analisar as propriedades mecânicas de compósitos 100% biodegradáveis e totalmente provenientes de fonte renováveis, foram fabricados e testados provetes de PLA reforçado com uma fracção volúmica de, aproximadamente, 30% de fibras curtas de juta [48]. Os autores do referido estudo, produziram os provetes através

da moldação por injeção e concluíram que, por um lado, a adição de fibras de reforço incrementou o módulo de elasticidade em 100% relativamente ao PLA não reforçado. Por outro lado, verificou-se neste estudo, que o reforço fibroso de juta diminuiu, em cerca de 30%, a resistência à tracção do PLA. A resistência à tracção do PLA não reforçado é cerca de 65 MPa, enquanto o PLA reforçado com fibras de juta não vai além dos 50 MPa. Relativamente ao módulo de elasticidade, o PLA não reforçado apresenta um módulo de 4 GPa, enquanto o PLA reforçado consegue atingir valores ligeiramente superiores 10 GPa.

2.4. Técnicas de fabrico de compósitos reforçados com fibras naturais

Existem várias técnicas de produção de polímeros reforçados com fibras naturais, que são similares às utilizadas na produção de compósitos reforçados com fibras sintéticas. A escolha da técnica mais adequada para um determinado componente depende de factores económicos, do tipo de fibra natural utilizado, das quantidades a produzir e das exigências requeridas ao componente. Um conhecimento aprofundado sobre os diferentes métodos de produção de compósitos, permite uma grande eficácia na selecção da técnica de fabrico mais adequada para um determinado componente.

O facto dos polímeros termoplásticos poderem ser reciclados, motiva um grande interesse no desenvolvimento de técnicas de fabrico de compósitos de matriz termoplástica reforçada com fibras naturais. As técnicas mais utilizadas e estudadas para a produção deste tipo de compósitos são a moldação por injeção, moldação por compressão, extrusão e a pultrusão. Contudo, algumas das técnicas referidas anteriormente devem ainda ser desenvolvidas de forma a reduzir os danos, que por vezes são infligidos às fibras naturais durante o processamento, danos esses, que resultam das elevadas temperatura e das forças de corte típicas destes processos [34].

Para a produção de compósitos de matriz termoendurecível reforçados com fibras naturais, a técnica mais comum e largamente utilizada na indústria automóvel é a moldação por compressão. Outras técnicas convencionais são também utilizadas como por exemplo a

moldação manual, moldação por vácuo, moldação por transferência de resina (RTM – *Resin Transfer Moulding*), pultrusão e o enrolamento filamentar [34]. Para além das técnicas mais convencionais já referidas, alguns estudos demonstraram que existe viabilidade na utilização de pré-impregnados para a produção de compósitos termoendurecíveis reforçados por fibras de linho e cânhamo [27, 34].

2.4.1. Moldação Manual

A moldação manual é provavelmente o método mais antigo para a produção de polímeros termoendurecíveis reforçados com fibras [15, 17]. Para além disso, é o método mais comum e económico utilizado principalmente na produção de compósitos de fibras de vidro [1].

O procedimento para levar a cabo a produção de um compósito através deste método inicia-se com a preparação do molde onde se realizará o empilhamento das camadas de reforço. Esta preparação consiste na aplicação de um agente desmoldante sobre o molde, com o objectivo de facilitar a desmoldagem após a cura da resina. Em seguida, as camadas de tecido, manta ou fibras unidireccionais são empilhadas e impregnadas de resina uma a uma no molde aberto. A impregnação é realizada manualmente com a ajuda de rolos ou pinceis pressionando as camadas para eliminar não só as bolhas de ar, mas também para eliminar o excesso de resina. Após o empilhamento de todas as camadas, a eventual aplicação de uma placa de moldação superior permite a obtenção de um bom acabamento na superfície externa do compósito. A rugosidade superficial de um compósito obtido por moldação manual, depende da superfície do molde e a qualidade geral do laminado final depende fortemente da habilidade e cuidado do operador. Relativamente à quantidade de fibras, a utilização deste método permite obter compósitos com cerca de 25% de fibras [1].

No caso particular da utilização do processo de moldação manual para fabrico de compósitos reforçados com fibras naturais, a percentagem de fibras depende, em grande medida, das características anatómicas das fibras utilizadas. Se as fibras naturais utilizadas possuem um lúmen grande e paredes celulares finas, a percentagem de fibras no compósito pode ser aumentada através da aplicação de pressão, reduzindo assim os vazios no interior das fibras. Outro aspecto importante a ter em consideração quando se utilizam fibras

naturais no processo de moldação manual é a secagem das fibras. Para evitar fraca molhabilidade e o aprisionamento de humidade no interior do compósito, as fibras devem ser secas antes de se proceder ao empilhamento e impregnação com resina [27].

O pouco equipamento necessário, o baixo investimento inicial e as poucas restrições geométricas são as principais vantagens da utilização da moldação manual para a produção de compósitos. Contudo, existem também algumas desvantagens associadas à utilização deste processo de fabrico. A qualidade do produto final depende muito da habilidade do operário, a baixa produtividade e a libertação de voláteis são as principais desvantagens da moldação manual.

Esta técnica de fabrico é adequada à produção de pequenas séries e é muito utilizada na produção de pequenas embarcações, painéis de edifícios, reforços e reparações. A Figura 2.28 mostra, esquematicamente, o processo de moldação manual.

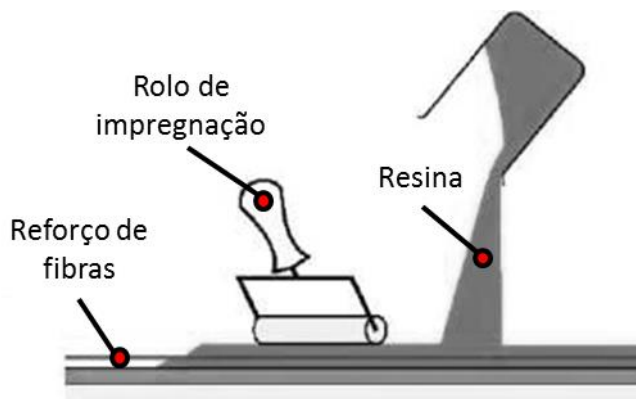


Figura 2.28 – Representação esquemática do processo de moldação manual (adaptado de [49])

2.4.2. Moldação Manual Assistida por Vácuo

O processo de moldação manual assistido por vácuo segue todos os passos descritos no subcapítulo anterior (Moldação Manual), com uma particularidade final. O conjunto formado pelo laminado e pela moldação é envolto num filme plástico. O filme plástico é vedado (formando assim um saco de vácuo) de forma a evitar fugas de ar aquando da aplicação de vácuo. No interior do saco, é colocada uma rede que evita a rotura do filme plástico e permite uma melhor circulação do vácuo. O ar é retirado do interior do saco, com

a ajuda de uma bomba de vácuo. Desta forma consegue-se não só uma distribuição de resina mais uniforme, mas também uma diminuição do número de bolhas de ar no interior do compósito. Para além destas vantagens, uma vez que a cura se realizem em molde fechado, a emissão de voláteis é reduzida comparativamente ao processo de moldação manual. Por outro lado, a principal desvantagem na utilização deste processo é a baixa produtividade. A Figura 2.29 mostra, esquematicamente, os materiais e equipamentos necessários, para realizar o processo de moldação manual assistida por vácuo.

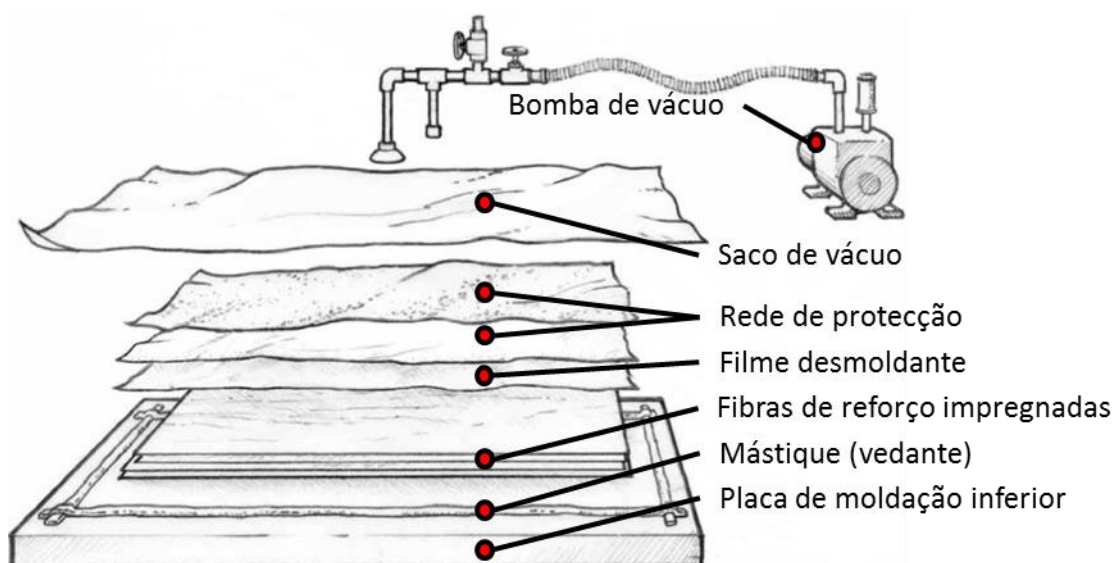


Figura 2.29 – Representação esquemática dos materiais e equipamentos necessários para realizar o processo de moldação manual assistido por vácuo (adaptado de[50])

2.5. Aplicação de compósitos reforçados com fibras naturais

As preocupações ecológicas e o baixo custo associado ao bom desempenho mecânico, têm conduzido o desenvolvimento de diferentes aplicações dos compósitos reforçados com fibras naturais. A indústria automóvel tem sido a principal impulsionadora no desenvolvimento destes materiais mais ecológicos. Para além dos automóveis, o sector da construção civil é também uma área com grande potencial de crescimento dos compósitos reforçados por fibras naturais.

Na indústria automóvel, razões comerciais e técnicas estão na base do elevado desenvolvimento dos compósitos reforçados por fibras naturais. Estes materiais são utilizados sobretudo na produção de componentes interiores para automóveis. Exemplos disso são os painéis das portas, encostos, forro do porta-bagagens, cobertura de rodas suplentes, apoios de cabeça, painéis para o chão e painel de instrumentos. A Figura 2.30 mostra alguns componentes de um automóvel, produzidos em compósitos reforçados por fibras naturais.



Figura 2.30 – Componentes do automóvel Mercedes Classe S, produzidos em compósitos reforçados por diferentes fibras naturais (adaptado de[51])

A substituição das tradicionais fibras de vidro por fibras naturais traz consigo benefícios ecológicos, económicos e técnicos. Entre as principais vantagens destacam-se [27]:

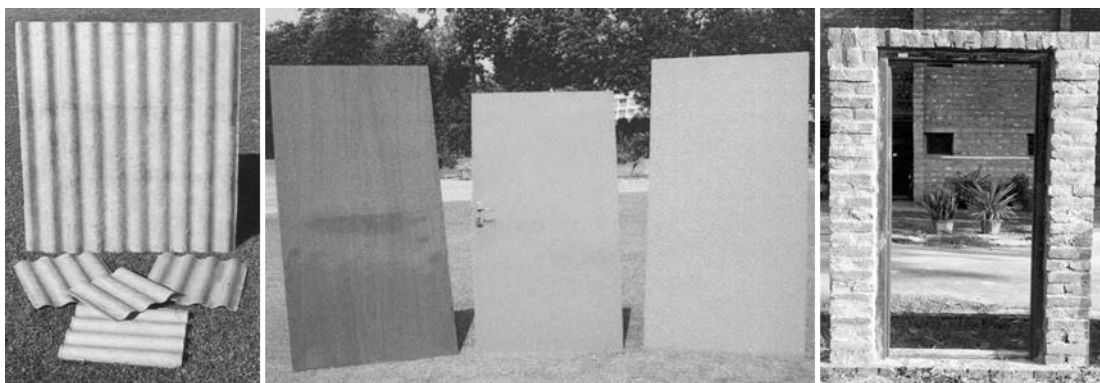
- ✓ A redução de custos: as fibras naturais são 25 a 50 % mais baratas que as fibras de vidro;
- ✓ Redução do peso dos componentes, dada a menor densidade das fibras naturais: possibilita uma redução do consumo de combustíveis durante a vida útil do automóvel;
- ✓ Material mais seguro: ausência de fragmentação e elevada estabilidade em caso de acidente rodoviário.

- ✓ Boas propriedades de isolamento acústico e isolamento térmico;
- ✓ As fibras naturais não são abrasivas às ferramentas de fabrico;
- ✓ Propriedades mecânicas específicas semelhantes às dos compósitos reforçados por fibras de vidro;
- ✓ As irritações dermatológicas ou os problemas respiratórios associados ao manuseamento das fibras de vidro, não se verificam durante a produção de componentes que usam as fibras naturais como reforço;
- ✓ Existem boa disponibilidade e abundancia de fibras naturais em todo o mundo.

Apesar de todos os benefícios referidos, as fibras vegetais possuem características inerentes à sua natureza que limitam a utilização em algumas aplicações no ramo automóvel, como por exemplo, componentes exteriores, sujeitos a impactos, à humidade e a condições climatéricas adversas. Exemplos típicos dessas limitações são:

- ✓ A natureza hidrófila das fibras naturais;
- ✓ A falta de adesão entre fibras naturais não tratadas e as matrizes poliméricas;
- ✓ A qualidade das fibras naturais é muito variável e depende das condições de crescimento das plantas e das técnicas de extracção das fibras;
- ✓ Baixa resistência ao impacto (resultante da concentração de defeitos das fibras naturais).

Relativamente ao sector da construção civil, os compósitos reforçados com fibras naturais têm sido utilizados como materiais alternativos, sobretudo em substituição dos produtos de madeira. O baixo custo associado à utilização das fibras vegetais, faz deste tipo de materiais uma mais-valia principalmente em países em desenvolvimento. Exemplos dos elementos fabricados para utilização na construção são: molduras de portas e janelas, persianas, painéis divisórios, telhas, estruturas “sandwich” para portas e paredes, cercas e placas para isolamento térmico e acústico [27]. A Figura 2.31, mostra alguns exemplos de produtos para a construção, fabricados em compósito reforçado por fibras naturais



a)

b)

c)

Figura 2.31 – Materiais de construção fabricado em compósitos reforçados com fibras naturais: a) Telhas onduladas de poliéster reforçado com sisal; b) Portas em material compósito (reforço de juta/sisal); c) Caixilharia de uma porta em material compósito reforçado com juta (perfis obtidos por pultrusão) [27]

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Introdução

Neste capítulo descrevem-se as matérias-primas utilizadas neste estudo para o fabrico dos compósitos e resumem-se os principais procedimentos experimentais de ensaio aos quais as matérias-primas e os compósitos foram sujeitos.

De uma forma geral, os ensaios realizados às fibras de juta tiveram como principais objectivos a caracterização têxtil e a determinação das propriedades mecânicas do tecido.

Relativamente aos ensaios para a caracterização mecânica dos compósitos reforçados com fibras de juta, o objectivo foi essencialmente determinar as propriedades mecânicas dos compósitos produzidos com diferentes tipos de matrizes.

3.2. Matérias-primas

3.2.1. Matrizes

Para o fabrico dos compósitos, foram utilizados três tipos de matrizes poliméricas, reforçadas com fibras de juta. Foram produzidas duas placas de compósito utilizando resina de poliéster insaturado ortoftálico, uma placa utilizando resina de epóxico e no final três placas com PLA como matriz.

3.2.1.1. Resina de Poliéster Insaturado Ortoftálico

A resina de poliéster utilizada como matriz dos compósitos produzidos, foi adquirida a uma empresa nacional. O baixo custo aliado à facilidade de utilização e aquisição que esta resina apresenta, foram os principais motivos que conduziram à selecção do poliéster para matriz dos compósitos reforçados com fibras de juta. As propriedades mecânicas à tracção e à flexão da resina de poliéster insaturado ortoftálico, foram recolhidas da bibliografia consultada e estão apresentadas na Tabela 3.1 [15, 17, 52].

3.2.1.2. Resina de Epóxido

A resina de epóxido utilizada como matriz das placas de compósito produzidas foi a *SICOMIN SR 1500*. Segundo o fabricante, esta resina foi desenvolvida para ser aplicada na indústria aeronáutica, construção de barcos e construção de protótipos na indústria automóvel. Esta resina, possibilita uma boa molhabilidade e garante uma excelente adesão a vários tipos de reforço, como por exemplo as fibras de vidro, aramídicas, carbono e poliéster. As propriedades mecânicas à tracção e à flexão da resina de epóxido, indicadas pelo fabricante, estão apresentadas na Tabela 3.1. A resina de epóxido (bastante mais cara que a resina de poliéster e geralmente utilizada em mercados avançados), foi seleccionada com o objectivo de permitir uma comparação das propriedades mecânicas entre compósitos com reforços semelhantes mas, com matrizes de qualidades e preços de aquisição muito distintos.

Tabela 3.1 – Propriedades das resinas de epóxido e de poliéster utilizadas como matrizes dos compósitos produzidos [15, 17, 52]

Propriedade	Resina de Epóxido (SICOMIN SR 1500 + Endurecedor SD 2505, com cura à temperatura ambiente)		Resina de poliéster insaturado ortoftálico	
	Tracção	Flexão	Tracção	Flexão
Tensão de rotura (MPa)	77	115	55	80
Módulo de elasticidade (GPa)	3,1	3,2	3,45	3,45
Deformação na rotura (%)	4,5	7,7	2,1	-
Massa específica (g/cm ³)	1,13		1,20	
Temperatura de transição vítrea (°C)	56		-	

3.2.1.3. PLA (ácido poliláctico)

O PLA, utilizado como matriz de um dos compósitos fabricados, denominado *Ingeo™ 3051D* foi adquirido à *RESINEX*. Segundo o fabricante, este polímero pode ser processado através de moldação por injeção para a produção de copos, pratos e talheres descartáveis. Este polímero, biodegradável e proveniente de recursos renováveis, constitui uma mais-valia em

termos ecológicos. A selecção do PLA teve como principal objectivo, levar a cabo a caracterização mecânica de um compósito totalmente biodegradável, com matriz e reforço fibroso provenientes de recursos renováveis. A Tabela 3.2 [53] mostra as principais propriedades do PLA indicadas pelo fabricante.

Tabela 3.2 – Propriedades do PLA, fornecidas pelo fabricante [53]

PLA Ingeo™ 3051D da RESINEX		
Propriedade	Tracção	Flexão
Tensão de rotura (MPa)	48,3	82,7
Módulo de elasticidade (GPa)	-	3,83
Deformação na rotura (%)	2,5	-
Massa específica (g/cm ³)	1,25	
Temperatura de transição vítrea (°C)	60	

3.2.2. Tecido de juta

Para o fabrico dos compósitos, foram utilizadas fibras de juta como reforço. Estas fibras, comercializadas em tecido bidireccional, foram adquiridas à “Casa dos Linhos” no Porto.

A selecção das fibras de reforço para o presente estudo justifica-se pela grande versatilidade, durabilidade, fabrico abundante, pelas boas propriedades mecânicas específicas (que lhes permite competir com as fibras sintéticas de vidro) e principalmente pela facilidade de aquisição que o tecido de fibras de juta apresenta.

Dada à pouca ou inexistente informação sobre o tecido de juta adquirido, foi necessário realizar alguns ensaios tipicamente usados na indústria têxtil. O conhecimento das principais propriedades do tecido é fundamental, não só para um correcto fabrico dos compósitos, mas também porque pode permitir prever as propriedades dos compósitos produzidos.

Assim, para levar a cabo a caracterização das fibras do reforço foram realizados ensaios, quer aos fios da trama e da teia que constituem o tecido, quer ao próprio tecido de juta. A

distinção entre os fios da teia e da trama é facilmente observada nos cantos do tecido adquirido. Os fios da trama apresentam-se ligeiramente desfiados na extremidade do tecido, formando assim uma franja. Os fios da teia encontram-se entrelaçados, perpendicularmente aos fios da trama. A Figura 3.1 mostra, de uma forma simples, as diferenças entre os fios da teia e os fios da trama.

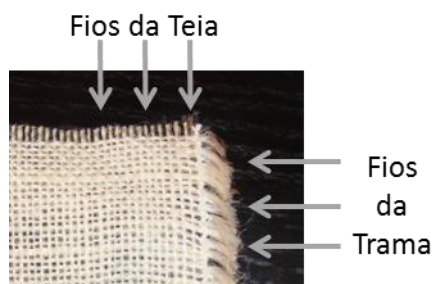


Figura 3.1 – Distinção entre os fios da teia e da trama

3.2.2.1. Determinação da massa por unidade de superfície

A massa por unidade de superfície é definida como sendo a massa de uma área conhecida de tecido, dividida por essa mesma área, expressa em gramas por metro quadrado. Gramagem do tecido ou massa específica do tecido são outras duas designações possíveis para a massa por unidade de superfície.

A determinação da massa por unidade de superfície do tecido de juta foi realizada segundo a norma NP EN 12127 [54]. Este ensaio consiste na extracção de 5 provetes a partir do tecido a ser testado. Estes provetes são retirados do tecido com a ajuda da ferramenta de corte normalizada da Figura 3.2.



Figura 3.2 – Ferramenta de corte de amostra de tecido com área de 100 cm²

Esta ferramenta corta os provetes de forma circular e com uma área de 100 cm² (Figura 3.3). Os provetes devem ser cortados de forma que estes sejam representativos de todo o tecido, isto é, os provetes devem ser retirados de diferentes zonas do tecido.

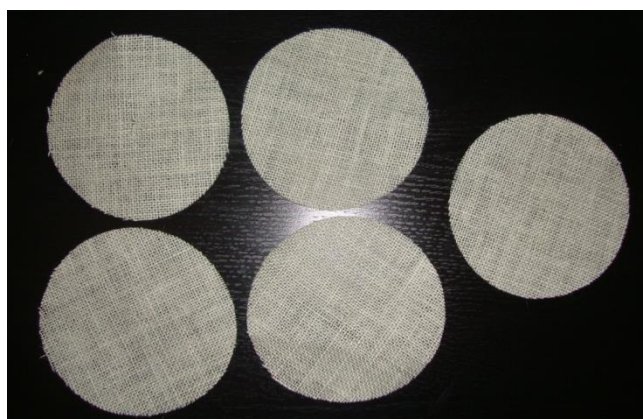


Figura 3.3 – Provetes circulares com área de 100 cm², sujeitos ao ensaio de determinação da massa por unidade de superfície

Após o corte, os provetes são colocados individualmente numa balança digital para a determinação da sua massa. A massa por unidade de superfície ou gramagem do tecido (G_f), é calculada através da seguinte expressão:

$$G_f = \frac{m_{pc} \times 10000}{A_{pc}} \quad 3.1$$

Onde,

m_{pc} , é a massa do provete circular (g);

A_{pc} , é a área conhecida de 100 cm² do provete circular.

A massa por unidade de superfície de um tecido, é uma propriedade muito importante para o fabrico de materiais compósitos. O produto da gramagem pela área de tecido utilizada para o fabrico de um compósito, permite determinar a massa de reforço fibroso utilizado.

3.2.2.2. Determinação da massa linear

A massa linear, também designada por Título do Fio, define-se como sendo a massa em gramas de um fio (ou outro têxtil linear) com um quilómetro de comprimento. A unidade mais utilizada para massa linear é o Tex (1Tex= 1g/1000m).

A determinação da massa linear do tecido de juta foi realizada segundo a norma NF G 07-101 [55]. Este ensaio consiste na preparação de 10 amostras de fios da trama e 10 amostras de fios da teia com 50 cm de comprimento.

Iniciando o ensaio com os fios da trama, procedeu-se da seguinte forma:

A massa da amostra a ser ensaiada (fio da trama), cortado com aproximadamente 50 cm, é determinada recorrendo ao uso de uma balança de precisão. Após a pesagem, a amostra é colocada no dispositivo da Figura 3.4 designado por malhímetro (*Maillemètre*).



Figura 3.4 – Malhímetro

Este aparelho permite determinar o comprimento do fio quando este está a ser tensionado com a ajuda de um peso. Para o comprimento da amostra calcula-se a massa linear (M_{lin}) em unidades Tex.

$$M_{lin} [Tex] = \frac{m_{fio} [g]}{c_{ft} [km]} \quad 3.2$$

Onde,

m_{fio} , é a massa do fio (g);

c_{ft} , é o comprimento do fio tensionado (km).

Este primeiro valor da massa linear relativo à primeira amostra serve apenas para a aplicação da expressão 3.3, de forma a corrigir e determinar o peso a utilizar no malhímetro para todos os ensaios.

$$0,2 \times M_{lin} [Tex] + 4 \quad 3.3$$

Com o resultado da expressão anterior é necessário consultar uma tabela presente na Norma AFNOR NF G 07-101 [55], que indica qual o peso correcto que se deve utilizar para tensionar todas as amostras de fios da trama no malhímetro.

Após a determinação do peso correcto a ser utilizado nas 10 amostras, o fio da primeira amostra é novamente colocado no dispositivo e realiza-se novamente a medição do seu comprimento. É este novo valor do comprimento do fio que vai ser utilizado para determinar a massa linear. Sendo o valor do peso que tensiona o fio, igual para as restantes 9 amostras de fios da trama, apenas se repetem os procedimentos de pesagem e de determinação do comprimento para cada fio.

O procedimento é repetido, de igual forma, para as 10 amostras de fios da teia.

Depois de determinada a massa linear dos fios da teia e da trama, e sabendo a massa específica do tecido, é possível calcular a secção transversal teórica dos fios, através da seguinte expressão:

$$m_{fio}[kg] = A_{fio}[m^2] \times c_{ft}[m] \times \rho_{tecido} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad 3.4$$

Sendo,

A_{fio} , a área da secção transversal dos fios;

ρ_{tecido} , a massa específica do tecido.

Isolando o termo da área da secção transversal do fio, temos:

$$A_{fio}[m^2] = \frac{m_{fio}[kg]}{c_{ft}[m] \times \rho_{tecido} \left[\frac{kg}{m^3} \right]} \quad 3.5$$

Sendo o quociente entre a massa do fio e o comprimento do fio tensionado igual à massa linear já determinada no ensaio, resta converter a massa do fio para gramas e o comprimento do fio para quilómetros. Para que seja mais conveniente, a unidade da área da secção transversal dos fios, deve também ser convertida, neste caso para milímetro quadrado. Assim, temos:

$$A_{fio}[m^2 \times 10^6] = \frac{m_{fio}[kg \times 10^3]}{c_{ft}[m \times 10^{-3}]} \times \frac{1}{\rho_{tecido} \left[\frac{kg}{m^3} \right]} \quad 3.6$$

Ou seja:

$$A_{fio}[mm^2] = \frac{m_{fio}[g]}{c_{ft}[km]} \times \frac{1}{\rho_{tecido} \left[\frac{kg}{m^3} \right]} \quad 3.7$$

Simplificando, temos:

$$A_{fio}[mm^2] = \frac{M_{lin} [Tex]}{\rho_{tecido} \left[\frac{kg}{m^3} \right]} \quad 3.8$$

A área da secção transversal é um parâmetro muito importante, uma vez que é fundamental para posteriormente, determinar a tensão de rotura do tecido. Contudo, apesar de ser possível determinar teoricamente a área da secção transversal dos fios, foi realizada uma medição experimental, realizando várias observações ao microscópio óptico como se descreve no subcapítulo 3.2.2.6.

3.2.2.3. Contracção dos fios

Com os valores do comprimento dos fios obtidos no ensaio de determinação da massa linear, é possível calcular a contracção dos fios. A contracção (em percentagem) é dada pela seguinte expressão:

$$\text{Contracção} = \frac{c_{ft} - c_f}{c_{ft}} \times 100 \quad 3.9$$

Sendo o comprimento do fio (c_f), igual a 50 cm (0,0005 km), e o comprimento do fio tensionado (c_{ft}), lido no malhímetro, para cada amostra.

3.2.2.4. Contextura do tecido

A contextura de um tecido é definida como sendo o número de fios da teia e da trama que existem numa área de 1 cm² de tecido. Para esta contagem utiliza-se um conta-fios como o da Figura 3.5.



Figura 3.5 – Conta-fios

O conta-fios é colocado em cima do tecido e através da observação visual, com a ajuda da pequena lupa, faz-se a contagem dos fios da teia e da trama. Foram realizadas cinco contagens em diferentes locais do tecido de juta, tendo em vista a obtenção de resultados representativos do todo o tecido. Com este ensaio define-se o parâmetro densidade de fios por centímetro.

3.2.2.5. Determinação da massa específica da juta

Existem diferentes métodos para determinar a massa específica das fibras naturais. Um estudo já realizado [56], com o objectivo de avaliar a precisão, o custo, a rapidez, a facilidade de execução e a segurança dos diferentes métodos, demonstrou que a técnica que melhor combina os vários parâmetros é o método de Arquimedes, utilizando como líquido de imersão o óleo de canola. No referido estudo, para além do método de Arquimedes com diferentes líquidos de imersão, foi também avaliada a eficácia da técnica de picnometria com hélio e da técnica de determinação da massa específica com base no diâmetro e na massa linear das fibras.

A Tabela 3.3 [56], mostra um resumo dos resultados obtidos no referido estudo.

Tabela 3.3 – Classificação dos diferentes métodos de determinação da massa específica (adaptado de [56])

Método		Precisão	Repetibilidade	Custo	Rapidez	Facilidade de execução	Segurança
Diâmetro e densidade linear das fibras		-	-	++	-	+++	+++
Método de Arquimedes	Metanol	+	+	++	++	+++	+
	Acetona	-	+	++	++	+++	+
	Óleo de canola	+++	++	++	++	+++	+++
	Água	-	-	++	++	+++	+++
	Etanol	-	-	++	++	+++	+
Picnometria com hélio		+++	+++	+	++	++	+++

Legenda:

“-” Medíocre;
 “+” Suficiente;
 “++” Bom;
 “+++” Excelente

Para levar a cabo a determinação da massa específica das fibras de juta, analisadas na presente dissertação, foi utilizado o método baseado no princípio de Arquimedes e o líquido de imersão escolhido foi a água, por este ser muito barato e de fácil aplicação, garantindo a precisão requerida para o ensaio.

O procedimento para a determinação da massa específica do tecido de juta, inicia-se com o corte e pesagem de pequenos provetes de tecido, com massa entre os 0,2 e 0,3 g, aproximadamente. Posteriormente são colocados 5 ml de água numa proveta de vidro graduada. Após a pesagem, os provetes são colocados na proveta de vidro e com a ajuda de uma vareta, são imersos na água como mostra a Figura 3.6.



Figura 3.6 – Proveta graduada, com provete de tecido de juta imerso em água

Após alguns minutos de espera, para que a água preencha os vazios do provete, é feita uma leitura do valor do volume da água + tecido. A diferença entre a leitura do volume final (água + tecido) e o volume inicial (5 ml) indica o volume de líquido deslocado.

A massa específica do tecido é dada pelo quociente entre a massa do provete e o volume de líquido deslocado, como indica a seguinte expressão:

$$\rho_{tecido} = \frac{m_{tecido}}{\Delta V} \quad 3.10$$

Onde,

ρ_{tecido} , é a massa específica do tecido (g/cm^3);

m_{tecido} , é a massa do provete de tecido (g);

ΔV , é o volume de líquido deslocado em mililitros ($\text{ml}=\text{cm}^3$).

Para levar a cabo a determinação da massa específica do tecido, foram pesados e imersos dez provetes de tecido segundo o procedimento já descrito, e no final foi calculada a média e o respectivo desvio da massa específica.

3.2.2.6. Determinação da área da secção transversal dos fios de juta

A determinação da área da secção transversal dos fios de juta, foi realizada através da observação ao microscópio óptico. Para esta medição, foi utilizado o microscópio óptico da Figura 3.7, da marca *Nikon*, modelo Eclipse e600, existente no Laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP.



Figura 3.7 – Microscópio óptico *Nikon*, modelo Eclipse e600

Antes da observação microscópica propriamente dita, foi necessário realizar os procedimentos descritos nos parágrafos seguintes.

O procedimento iniciou-se com uma observação à lupa, de uma amostra de poliéster reforçado com tecido de juta. A lupa da Figura 3.8 a), existente também no referido Laboratório de Metalografia, da marca *Zeiss*, modelo Stemi DV4, permitiu uma primeira observação e recolha de imagens da secção transversal do compósito, conforme ilustrado na Figura 3.8 b).

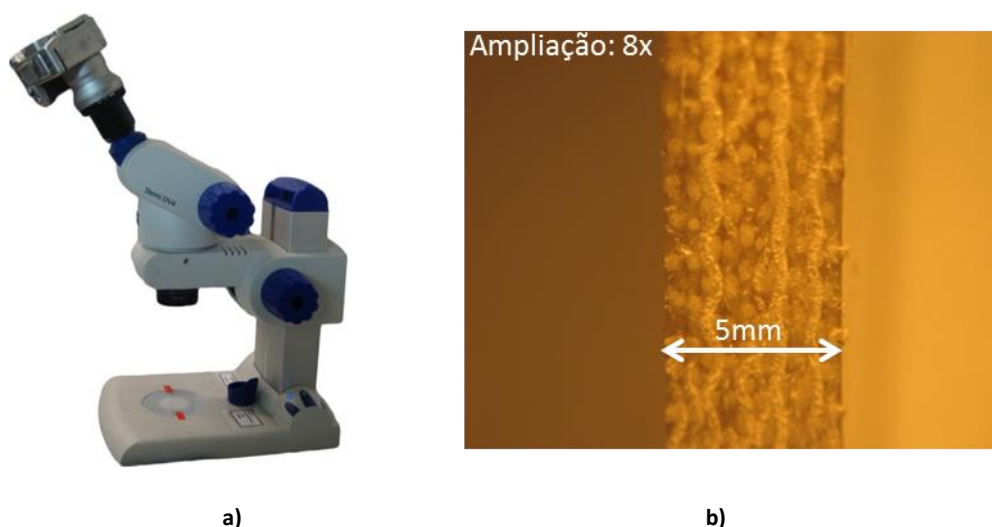


Figura 3.8 – a) Lupa Zeiss, modelo Stemi DV4; b) Fotografia obtida com a lupa (ampliação de 8x)

Posteriormente, a amostra foi cortada com dimensões mais adequadas à observação microscópica e de forma a permitir a observação da secção transversal de alguns fios do tecido. De seguida, iniciou-se o procedimento de preparação da amostra. Esta preparação, muito idêntica à utilizada numa metalografia convencional, consiste primeiramente em lixar a superfície da amostra que vai ser observada ao microscópio. O lixamento da superfície realizou-se com a ajuda da lixadora da Figura 3.9, e utilizando granulometrias de lixa sucessivamente decrescentes [57]. No caso particular da referida amostra utilizaram-se lixas com granulometria de 220 e 500 (número de grãos por polegada quadrada), colocadas nos pratos rotativos da lixadora.

No final do processo de lixamento, realizou-se o polimento da superfície utilizando para isso a polidora da Figura 3.9 e os respectivos panos de polimento. Durante o procedimento de polimento, deve ser colocado um líquido lubrificante e um abrasivo de pasta de diamante nos pratos rotativos da polidora [58]. Utilizou-se inicialmente um abrasivo de pasta de diamante de granulometria 3 μm e no final uma pasta de diamante de granulometria 1 μm .



Figura 3.9 – Equipamentos de lixamento e polimento: a) Lixadora; b) Polidora

Depois de todos os procedimentos descritos até aqui, a amostra de fibras de juta está pronta para ser observada ao microscópio óptico. Durante a observação, foram recolhidas algumas fotografias com ampliação de 100 vezes.

Para a determinação da área da secção transversal dos fios de fibras utilizou-se o *software Lumenera®*, *INFINITY ANALYZE*. Sabendo a ampliação de cada uma das fotografia e utilizando as ferramentas de medição do *software*, determinou-se a área da secção transversal de 10 fios do tecido, sendo 5 deles extraídos da teia e os outros 5 da trama.

Uma observação atenta das fotografias dos fios, obtidas no microscópio, revelou que existem espaços vazios, de tamanho considerável, entre os feixes de fibras. A Figura 3.10 mostra um fio da trama onde está bem patente a existência de vazios.

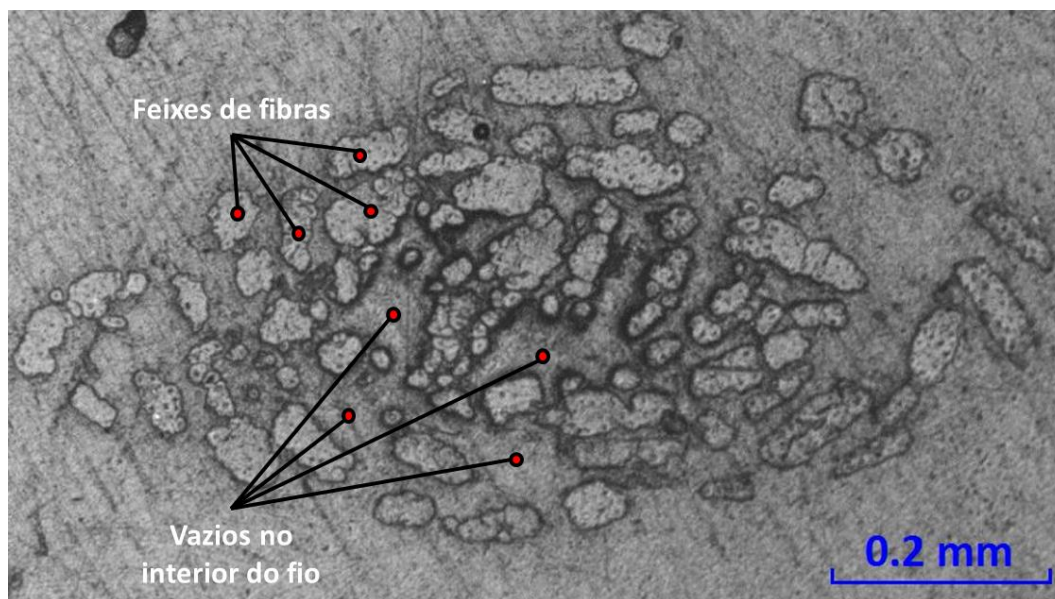


Figura 3.10 – Observação ao microscópio óptico de um fio da trama

Desta forma, para evitar a introdução de erros consideráveis, optou-se por medir cada uma das áreas dos feixes de fibras dos 10 fios de juta, ao invés de considerar uma secção transversal correspondente ao contorno exterior, circular ou oval. No total, foi medida a área da secção transversal de 806 feixes de fibras (pertencentes aos 10 fios observados). A Figura 3.11 mostra um fio da trama, com 75 feixes de fibras contornados por uma linha, desenhada com a ajuda do *software*, que permite a medição da área de cada um dos feixes.

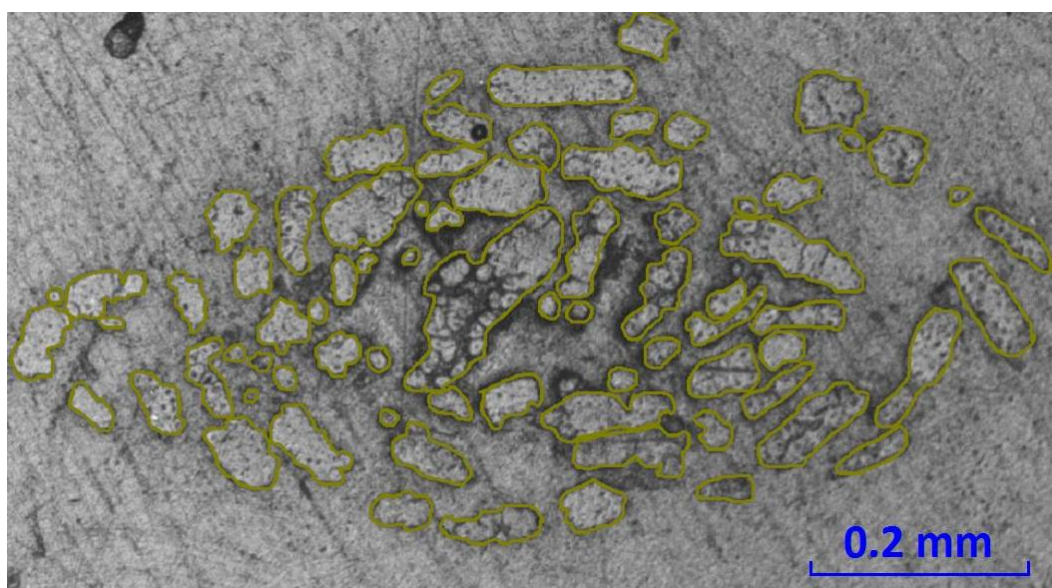


Figura 3.11 – Medição da secção transversal de um fio da trama com o auxílio do *software Lumenera®, INFINITY ANALYZE*

Posteriormente, as áreas de todos os feixes de fibras foram somadas para cada um dos fios observados e, por fim, foi determinada a área média da secção transversal dos fios da trama e da teia. Os resultados da referida medição podem ser consultados no subcapítulo 4.2.1. da presente dissertação.

3.2.2.7. Ensaio de tracção do tecido de juta

Para determinar a força máxima e o alongamento à força máxima do tecido de juta, submeteram-se provetes deste tecido com 300×50 (mm) a ensaios de tracção, de acordo com a norma NP EN ISO 13934-1 [59], com velocidade de alongamento constante, numa máquina universal de ensaios da marca *Hounsfield*. Os ensaios realizaram-se aplicando uma pré-tensão de 2 N aos provetes de tecido, utilizando uma célula de carga de 2,5 kN, à temperatura ambiente, a uma velocidade de separação entre amarras de 100 mm/min.

Neste ensaio, também designado pelo método da tira, são testadas 5 tiras de tecido à teia e 5 tiras de tecido à trama, no estado condicionado, ou seja, com o tecido seco.

Toda a largura de cada provete é fixada nas garras da máquina de ensaios. A distância inicial entre as referidas garras, designada por comprimento nominal é de 200 mm. A Figura 3.12 mostra a máquina de ensaios utilizada e um provete de tecido antes do ensaio.

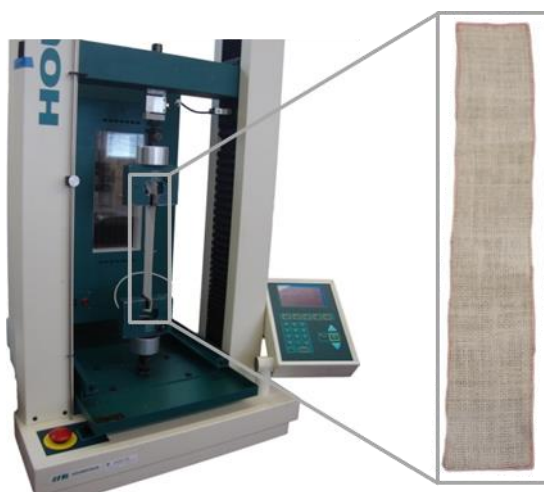


Figura 3.12 – Máquina universal de ensaios e provete (tira) de tecido de juta

Os dados dos ensaios (força e deslocamento do travessão móvel) foram registados no computador que se encontrava ligado ao dispositivo de ensaios. Os resultados finais extraídos deste ensaio são a média aritmética da força máxima, a média aritmética do alongamento na força máxima e força máxima por unidade de comprimento, para os provetes da teia e para os provetes da trama.

Para além dos resultados que são extraídos seguindo os procedimentos descritos na norma NP EN ISO 13934-1, foram também realizados alguns cálculos com o objectivo de determinar a tensão de rotura e o módulo de elasticidade do tecido à tracção. Normalmente, para comparar a resistência mecânica, à tracção, dos materiais tradicionais de engenharia utiliza-se o parâmetro tensão de rotura, definido como o quociente entre a força máxima e a área da secção transversal. Contudo, para comparar a resistência mecânica de diferentes fibras têxteis utiliza-se, habitualmente, o parâmetro tenacidade que se define como o quociente entre a força máxima e a densidade linear do tecido. A tenacidade do tecido é habitualmente utilizada em detrimento da tensão de rotura, uma vez que as fibras têxteis possuem geometrias de secção transversal mal definidas e difíceis de quantificar. Por essa razão, expressar a resistência mecânica de um tecido, em termos de tensão de rotura é susceptível de erros [60]. Apesar da possibilidade de serem cometidos erros, a determinação da tensão do tecido de juta é essencial para levar a cabo o cálculo das propriedades teóricas dos compósitos, através da aplicação da lei das misturas.

Para levar a cabo a determinação do módulo e da tensão de rotura, determinou-se a área da secção transversal do tecido, utilizando os dados recolhidos da microscopia e os dados do ensaio de contextura do tecido. O produto entre o número de fios existentes em 50 mm de tecido e a área média da secção transversal dos fios é, aproximadamente igual à secção transversal média da tira de tecido ensaiada.

Conhecida a área da secção transversal do tecido, a tensão de rotura do tecido é dada pelo quociente entre a força máxima e a área da secção transversal do tecido. O módulo de elasticidade foi determinado pelo declive da curva tensão-deformação na sua zona de proporcionalidade, também designada por zona elástica. Para a determinação do declive da curva de ensaio, recorreu-se ao método dos mínimos quadrados, aproximando todos os pontos do domínio elástico a uma recta de regressão linear. Uma vez que não foi utilizado

extensómetro, existe a possibilidade dos valores do módulo de elasticidade serem influenciados pela deformação (inevitável) da máquina de ensaios.

Uma vez determinadas as propriedades do tecido, torna-se necessário definir a forma como o empilhamento será realizado. As diferentes propriedades entre a teia e a trama, caso existam, podem influenciar as propriedades mecânicas dos compósitos posteriormente produzidos. Assim, o empilhamento das várias camadas de tecido deve ser realizado de forma a evitar propriedades significativamente distintas, nas diferentes placas produzidas.

3.2.3. Fabrico e Caracterização de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais

Laminados de juta + poliéster

Foram produzidos, inicialmente, dois tipos de laminados de resina de poliéster reforçados com fibras de juta. Um dos laminados possuía as fibras do tecido alinhadas axialmente (0°) e a 90° com o comprimento (eixo axial) dos provetes. Um segundo tipo de laminado foi produzido com as fibras do tecido alinhadas a $\pm 45^\circ$ com eixo axial dos provetes. As dimensões ($250 \times 250 \times 5$ mm), o número de camadas bem como o teor ponderal de fibras e resina foi o mesmo utilizado na produção dos dois tipos de laminados, sendo a orientação das fibras a única diferença entre as referidas placas de compósito.

Foram empilhadas 10 camadas de tecido bidireccional de fibras de juta segundo a orientação já referida e utilizando resina suficiente para garantir uma fracção mássica de fibras de 30%, aproximadamente.

As camadas de tecido foram impregnadas segundo a seguinte sequência de empilhamento: $[(\text{Teia}/\text{Trama})_2/\text{Teia}]_5$, ou seja, a primeira camada foi colocada com os fios da teia posicionados na direcção longitudinal dos provetes. A segunda camada foi colocada com os fios da trama na direcção longitudinal dos provetes. Esta sequência inicial é repetida duas vezes. De seguida é colocada mais uma camada com os fios da teia na direcção longitudinal dos provetes, e o resto da sequência de empilhamento é realizada de forma a que o

laminado seja simétrico. O objectivo da referida sequência de empilhamento é proporcionar às placas, propriedades médias das características dos dois sistemas de fios (teia e trama). A Figura 3.13 mostra de uma forma simples o empilhamento realizado.

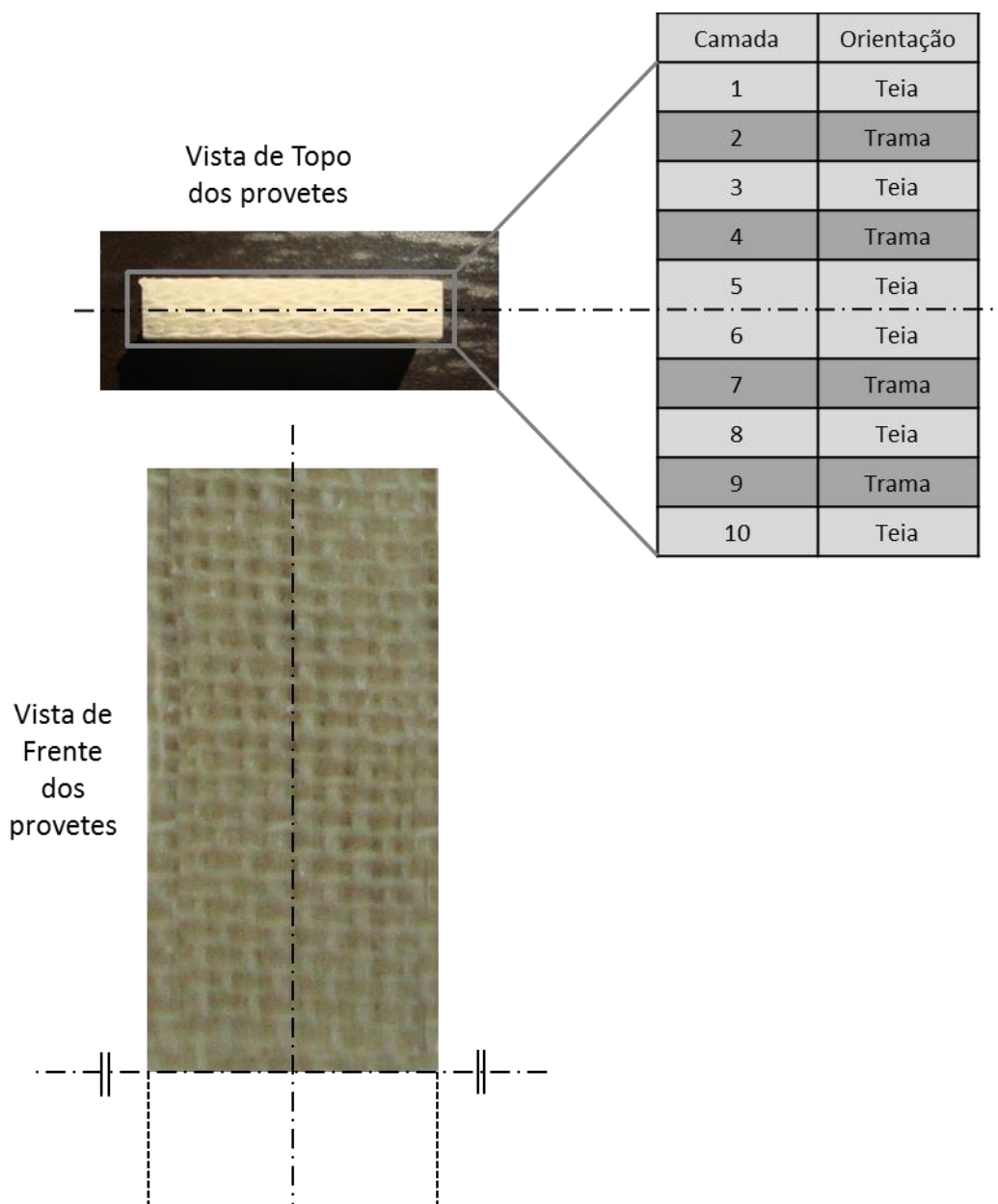


Figura 3.13 – Sequência de empilhamento dos laminados produzidos

As placas foram produzidas através de moldação manual assistida por vácuo à temperatura ambiente e seguindo o seguinte procedimento:

- 1) Cortou-se o tecido de juta, com dimensões aproximadamente de 250×250 mm;



Figura 3.14 – Tecido de juta já cortado com as dimensões: 250×250mm

- 2) Aplicou-se um agente desmoldante (*Paste Wiz*) no molde (placa de vidro);

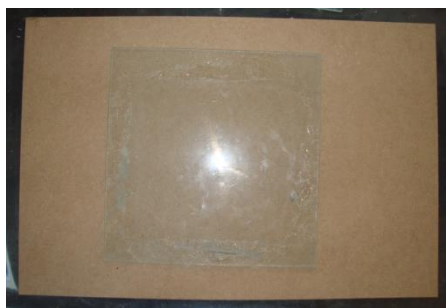


Figura 3.15 – Placa de vidro da moldação inferior, após a aplicação do agente desmoldante

- 3) Foram misturados os três componentes da resina de poliéster nas proporções: 97,7% de resina, 2,0% de catalisador (Peróxido de Metil-Etil-Cetona (MEKP)); 0,3% de acelerador (Octoato de Cobalto);
- 4) Aplicou-se a primeira camada de resina por cima do agente desmoldante e impregnou-se a primeira camada de tecido de fibras de juta;



Figura 3.16 – Impregnação do tecido de juta com a resina de poliéster

- 5) Repetiu-se o passo anterior para as restantes 9 camadas de poliéster e juta;
- 6) Aplicou-se um agente desmoldante no vidro da moldação superior e colocou-se o referido vidro na parte superior das camadas já empilhadas. A colocação do vidro deve ser realizada de forma vigorosa, aplicado bastante força para evitar ao máximo, vazios no interior da placa de compósito;



Figura 3.17 – Colocação do vidro de moldação superior, aplicando bastante força

- 7) De seguida, foi colocada uma rede de protecção e aplicou-se o saco de vácuo utilizando uma junta de vácuo para realizar a vedação. A rede deve ser colocada no interior do saco de vácuo de forma conveniente, isto é, de forma a evitar a rotura do saco aquando da aplicação de vácuo;

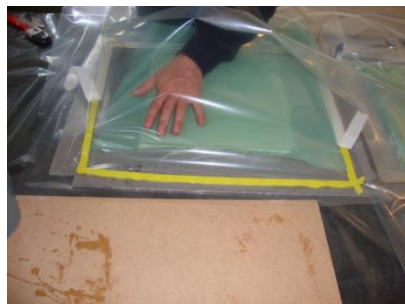


Figura 3.18 – Colocação da rede de protecção no interior do saco e vedação do saco de vácuo com junta de vácuo

- 8) Com a ajuda de uma bomba de vácuo, aplicou-se vácuo ao interior do saco e verificou-se se existiam fugas de ar audíveis. As fugas de ar audíveis deverão ser eliminadas através de ajustes na junta vedante do saco;

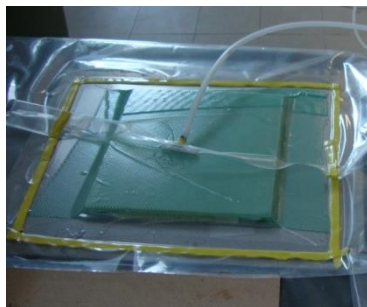


Figura 3.19 – Aplicação de vácuo

- 9) Após 8 horas de aplicação de vácuo, desligou-se a bomba e desmoldou-se a placa de compósito;
- 10) Marcaram-se as placas com as dimensões dos provetes e realizou-se o corte dos provetes numa serra de disco.

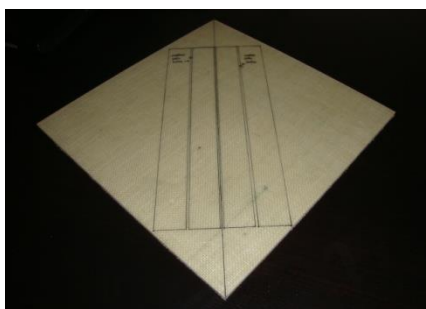


Figura 3.20 – Placa de poliéster reforçado com tecido de juta, marcada com as dimensões dos provetes

A Figura 3.21 mostra as duas placas de poliéster reforçado com fibras de juta produzidas. Nesta figura, é possível observar a diferente orientação das fibras nas duas placas.

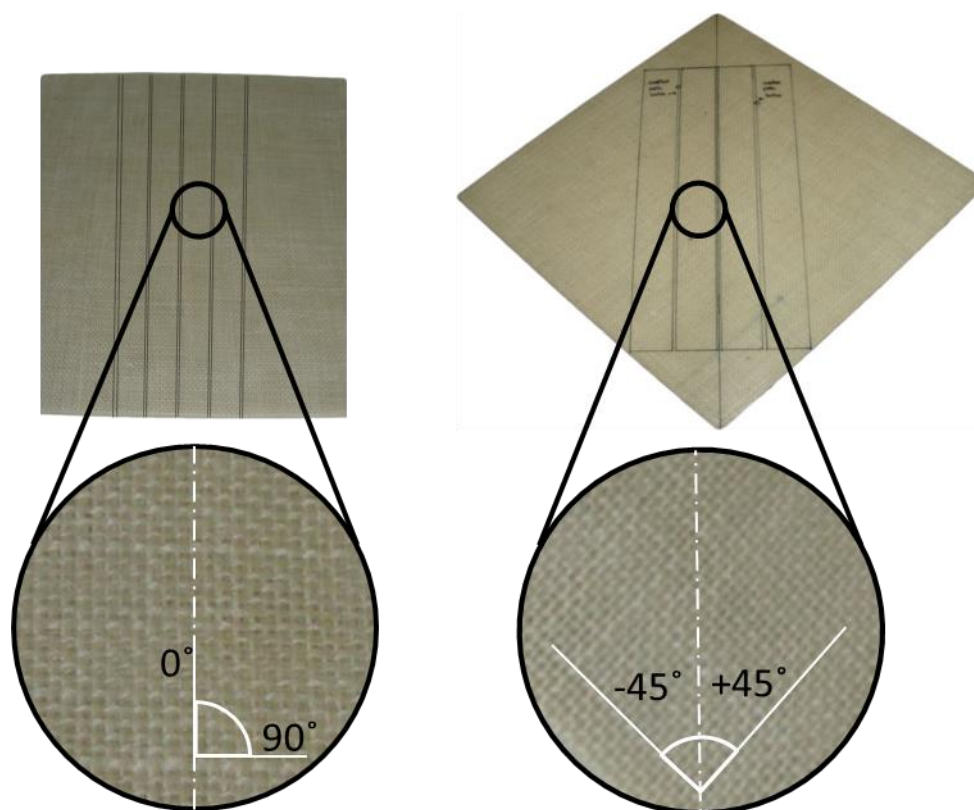


Figura 3.21 – Pormenor das diferentes orientações do tecido de juta nos compósitos de poliéster

Laminados de juta + Epóxido

Posteriormente foi fabricada uma placa de resina de epóxido, reforçada com fibras de juta. De uma forma geral, o procedimento para o fabrico desta placa foi idêntico ao procedimento de fabrico dos laminados de poliéster. A placa de epóxido, reforçada com tecido de juta, foi produzida com o objectivo de determinar as propriedades mecânicas de uma resina com melhores propriedades mecânicas que a de poliéster. Para levar a cabo esta caracterização, a resina de epóxido *SICOMIN SR 1500* foi misturada com o endurecedor *SICOMIN SD 2505* na proporção recomendada pelo fabricante de 100g de resina para 33g de endurecedor. Foram empilhadas e impregnadas 10 camadas de tecido bidireccional de fibras de juta com 250×250 (mm), com a sequência de empilhamento [(Teia/Trama)₂/Teia]₅. As fibras do tecido foram orientadas axialmente (0°) e a 90° com o comprimento dos provetes e foi utilizada para cálculo da quantidade de resina a utilizar, uma fracção mássica de fibras de 30%, aproximadamente. A Figura 3.22 mostra o laminado de epóxido, reforçado com tecido de juta.

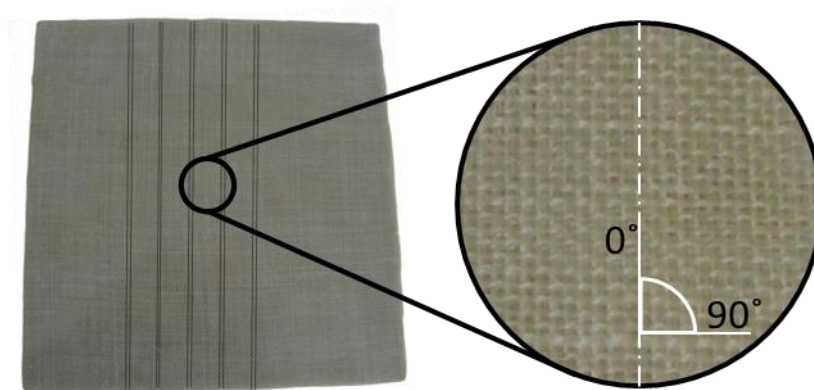


Figura 3.22 – Laminado de epóxico e pormenor da orientação do tecido

Compósitos de Juta + PLA

Por fim, foram fabricadas três placas de PLA reforçado por fibras de juta. Uma vez que o PLA é um polímero termoplástico, que possui elevada viscosidade à temperatura ambiente, e por isso exige que o seu processamento se realize com temperatura elevada, optou-se por fabricar estes compósitos, reforçados com fibras curtas de juta (25 mm de comprimento) utilizando o equipamento a seguir descrito. A Figura 3.23, mostra o polímero de PLA e as fibras de juta, cortadas no comprimento já referido.



Figura 3.23 – PLA e fibras de juta com 25mm de comprimentos

O objectivo do fabrico de compósitos, utilizando fibras curtas, é essencialmente garantir uma boa impregnação que dificilmente seria conseguida através da moldação manual, técnica utilizada para o fabrico das placas com matrizes termoendurecíveis, mesmo que esta fosse realizada com o PLA num estado de baixa viscosidade. No caso das placas de PLA foi

utilizada uma misturadora (Figura 3.24), existente no Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros (PIEP), que permite aquecer o polímero (com resistências eléctricas) e misturá-lo com as fibras, através da rotação de três barras metálicas no interior da câmara de mistura [61].

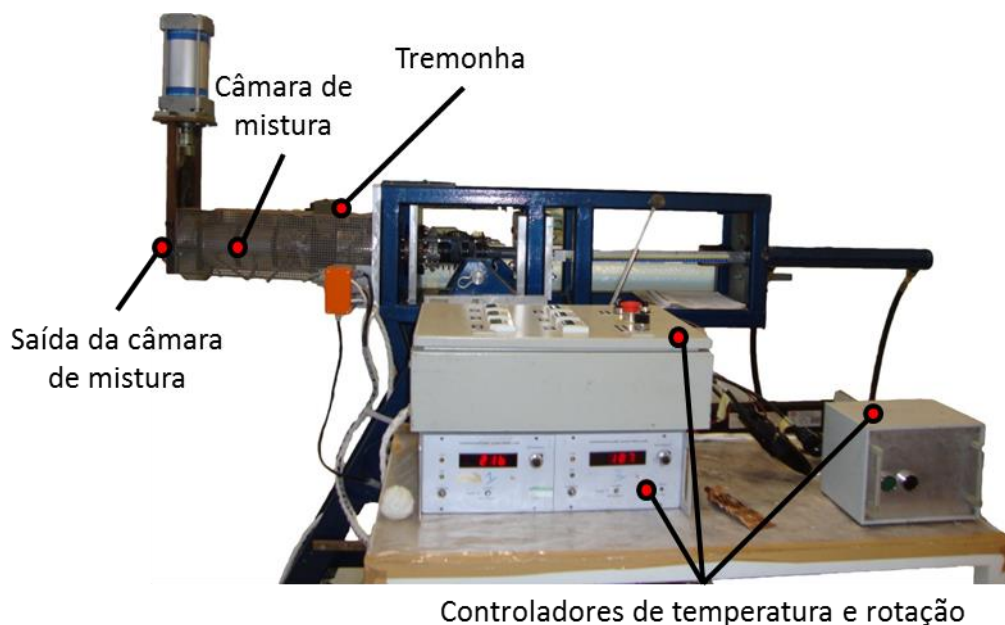


Figura 3.24 – Misturadora existente no PIEP

Antes da introdução do polímero e das fibras, as resistências eléctricas foram ligadas de forma a permitir o aquecimento progressivo da câmara de mistura. De seguida, realizou-se a pesagem do PLA e do reforço fibroso, de forma a produzir compósitos com uma fracção mássica de fibras de aproximadamente 15%. Posteriormente introduziu-se na câmara de mistura, através da tremonha e de uma forma faseada, o polímero e as fibras de juta. A mistura realizou-se à temperatura de 200 °C (recomendada pelo fabricante do PLA), durante 10 minutos. Ao fim de 10 minutos, a câmara de mistura foi aberta e o composto foi retirado, ainda num estado amolecido (Figura 3.25 a)). De uma forma bastante rápida, o composto é colocado, ainda quente, num molde de alumínio, que se encontra colocado no prato de uma prensa hidráulica (Figura 3.25 b)) permitindo a obtenção de uma placa por compressão e arrefecimento do referido composto de juta e PLA.

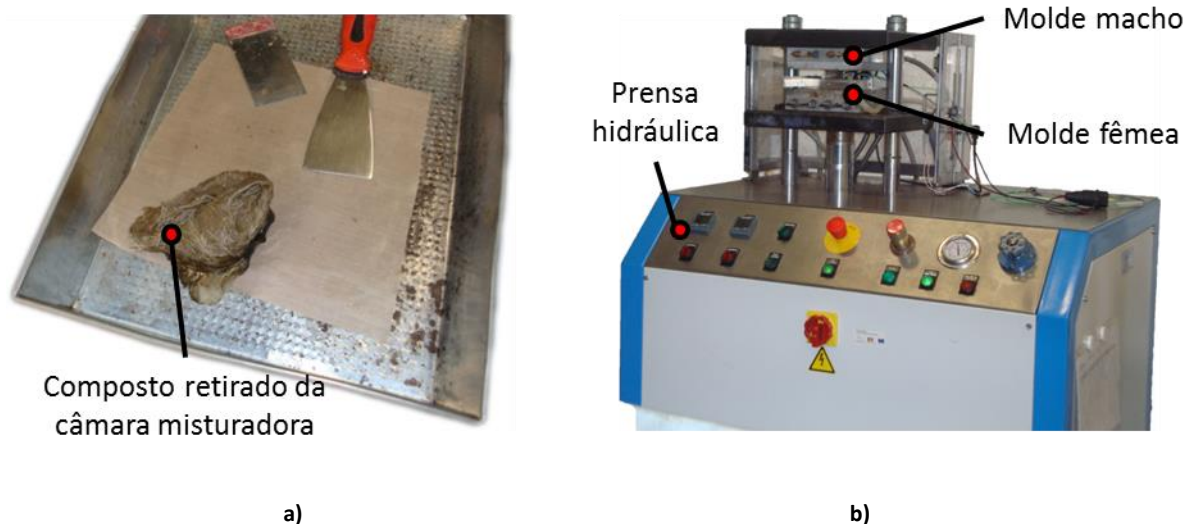


Figura 3.25 – a) Composto de PLA e juta; b) Prensa hidráulica e molde para obtenção de placas

Durante 5 minutos, ao mesmo tempo que é aplicada uma pressão de 100 bar com a ajuda da prensa, o molde é arrefecido através de um sistema de refrigeração por circulação de água. A Figura 3.26, mostra o aspecto final de uma placa de PLA reforçada com fibras curtas de juta, com dimensões de 100×100×5 (mm). Devido à inexistência de um molde com dimensões apropriadas, não foi possível extrair provetes com as dimensões impostas pela norma do ensaio de tracção. Ainda assim, foram extraídos e ensaiados provetes para determinar as propriedades à tracção e à flexão.



Figura 3.26 – Placa de PLA e fibras curtas de juta com 100×100×5mm

Apesar de não se verificar uma alteração considerável no aspecto visual das fibras embebidas na placa, uma vez que a temperatura utilizada no processamento do PLA (200 °C)

foi um pouco superior à temperatura de ignição da juta (193 °C), existe a possibilidade de ter ocorrido alguma degradação das fibras.

Para levar a cabo a caracterização dos laminados de poliéster, do laminado de epóxico e do compósito de PLA reforçado com fibras de juta, foram realizados ensaio de tracção e de flexão em três pontos. Os compósitos produzidos, foram cortados de forma a obter provetes com as dimensões indicadas pelas normas. O corte dos compósitos foi realizado na serra de disco diamantado (Figura 3.27), existente no Laboratório de Materiais Compósitos do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP.



Figura 3.27 – Serra de disco diamantado

Foram atribuídos aos provetes, extraídos das diferentes placas e sujeitos aos diferentes ensaios mecânicos, referências de forma a facilitar a leitura e interpretação dos resultados. Por exemplo, a referência “JP_T_0-90_P1” diz respeito ao provete de Juta e Poliéster (JP), sujeito ao ensaio de Tracção (T), com as fibras alinhadas a 0° e 90° (0-90) e com o número de Provette 1 (P1).

Para além dos ensaios mecânicos, foi realizada uma análise teórica, por aplicação da lei das misturas, para prever as principais propriedades mecânicas dos compósitos produzidos. A referida lei das misturas foi aplicada, considerando-se uma fracção volúmica de vazios nula. Os procedimentos de cálculo para determinação das propriedades da camada bem como os procedimentos experimentais dos referidos ensaios mecânicos, serão descritos nos subcapítulos seguintes.

3.2.3.1. Propriedades da camada

O teor de fibras e o seu arranjo no interior de uma matriz polimérica, influenciam de forma preponderante o comportamento mecânico de um material compósito. A aplicação da lei das misturas permite prever as principais propriedades mecânicas ideais dos compósitos, considerando-se que não existem vazios no interior do material.

A expressão seguinte permite determinar a espessura (t) de uma placa de compósito:

$$t = G_f \times \left(\frac{1}{\rho_f} + \frac{1 - \omega_f}{\rho_p \omega_f} \right) \times n \quad 3.11$$

onde,

G_f , é a gramagem do tecido (kg/m^2);

ρ_f , é a massa específica do tecido (kg/m^3);

ω_f , é a fracção mássica (ou ponderal) de fibras;

ρ_p , é a massa específica do polímero usado como matriz (kg/m^3);

n , é o número de camadas do laminado.

A expressão anterior serviu para a determinação da fracção mássica de fibras (ω_f), uma vez que todos os restantes parâmetros da equação já haviam sido determinados. A espessura do laminado foi medida com a ajuda de um paquímetro, a gramagem foi determinada no ensaio de determinação da massa por unidade de superfície, a massa específica da juta foi determinada através do ensaio descrito no subcapítulo 3.2.2.5 e a massa específica dos polímeros, utilizados como matrizes, foi fornecida pelos fabricantes.

A expressão seguinte permite determinar a fracção volúmica de fibras (v_f):

$$v_f = \frac{\frac{\omega_f}{\rho_f}}{\frac{\omega_f}{\rho_f} + \frac{1 - \omega_f}{\rho_p}} \quad 3.12$$

Com o valor da fracção de volúmica de fibras, podem então ser determinadas as propriedades mecânicas teóricas, como o módulo de elasticidade e a resistência mecânica.

O módulo de elasticidade de uma camada na direcção das fibras (E_1) é dado, segundo a lei das misturas, pela expressão:

$$E_1 = \eta E_f v_f + E_p (1 - v_f) \quad 3.13$$

onde,

η , é o factor de arranjo das fibras ($\eta=1 \rightarrow$ fibras contínuas; $\eta=0,5 \rightarrow$ tecidos equilibrados; $\eta=0,375 \rightarrow$ manta de filamentos aleatórios);

E_f , é o módulo de elasticidade das fibras (GPa);

E_p , é o módulo de elasticidade da matriz (GPa).

A resistência mecânica da camada na direcção das fibras (X_1) é dada pela expressão:

$$X_1 = \eta X_f v_f + X_p (1 - v_f) \quad 3.14$$

onde,

X_f , é a resistência mecânica das fibras (MPa);

X_p , é a resistência mecânica da matriz (MPa).

A expressão 3.14, considera-se válida apenas quando a deformação na rotura das fibras for inferior à da matriz e para fracções volúmicas de fibras superiores a um valor crítico [3]. No caso da deformação na rotura das fibras ser superior à da matriz, torna-se necessário determinar uma resistência mecânica das fibras (X_f^*), correspondente a um valor de deformação das fibras, igual ao valor de deformação na rotura da matriz. O valor de X_f , é então substituído por X_f^* na expressão 3.14 [1].

A lei das misturas permite também determinar a massa específica de um compósito (ρ_c), através da seguinte expressão:

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_p (1 - v_f) \quad 3.15$$

Os resultados teóricos do módulo de elasticidade na direcção das fibras, da resistência mecânica na direcção das fibras e da massa específica dos compósitos produzidos, estão apresentados no subcapítulo 4.2.2.1. da presente dissertação.

3.2.3.2. Ensaio de Tracção

Para determinar a tensão de rotura e o módulo de elasticidade à tracção dos compósitos produzidos, submeteram-se provetes com 250×25×5 (mm) a ensaios de tracção, de acordo com a norma ISO 527-4 [62], numa máquina universal de ensaios mecânicos Shimadzu Autograph AG-X Series. Os ensaios realizaram-se com uma célula de carga de 100 kN, à temperatura ambiente, a uma velocidade de separação entre amarras de 2 mm/min e usando um extensómetro para medir o deslocamento axial dos provetes.

A Figura 3.28 mostra os provetes do ensaio de tracção, a máquina de ensaios universal e o extensómetro utilizado.

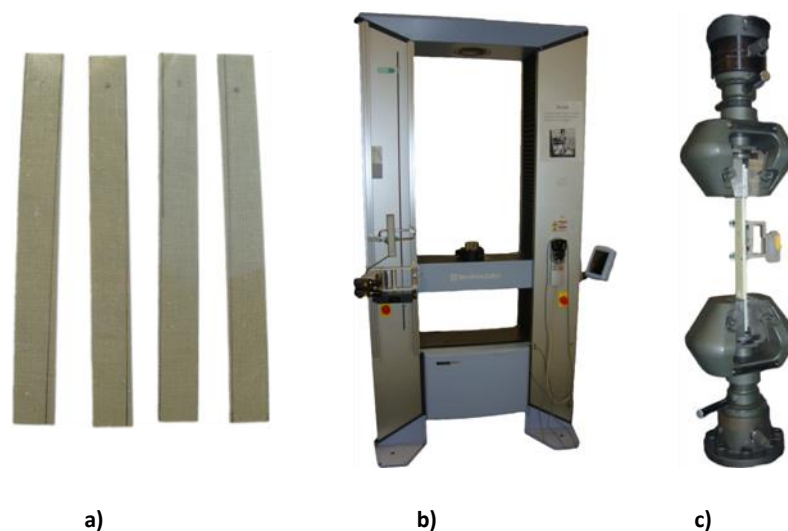


Figura 3.28 – a) Provetes do ensaio de tracção; b) Máquina universal de ensaios, Shimadzu Autograph AG-X Series; c) Garras utilizadas no ensaio de tracção e extensómetro aplicado num dos provetes

Para a determinação do módulo de elasticidade, foram ensaiados quatro provetes de cada placa de compósito fabricada e utilizou-se o referido extensómetro com comprimento inicial de referência axial de 50 mm. O extensómetro foi usado para medir o deslocamento axial até aos 0,3 mm, nos provetes.

A análise dos dados recolhidos iniciou-se traçando a curva de força-deslocamento para cada um dos provetes sujeitos ao ensaio. No passo seguinte traçou-se a correspondente curva de tensão-deformação, dividindo os valores da força pela área da secção transversal dos provetes e dividindo os valores do deslocamento pela distância entre amarras inicial (cerca

de 150 mm). A Figura 3.29 mostra o aspecto típico das curvas tensão-deformação, obtidas nos ensaios de tracção realizados aos compósitos produzidos.

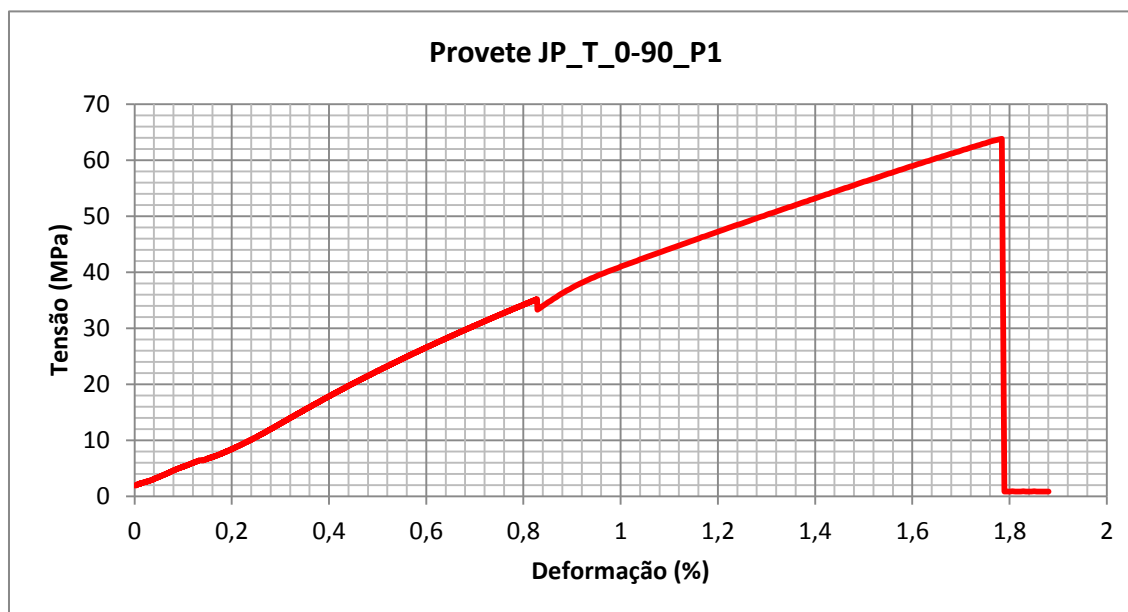


Figura 3.29 – Curva experimental típica dos ensaios de tracção realizados aos compósitos produzidos

Da análise das curvas de tensão-deformação verificou-se que para pequenas deformações, isto é, na parte inicial da curva tensão-deformação os provetes tinham um comportamento elástico, ou seja, obedeciam à lei de Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon \quad 3.16$$

Onde,

σ , é a tensão a que o provete está sujeito (MPa);

E , é o módulo de elasticidade à tracção (MPa);

ε , é a deformação aplicada.

O módulo de elasticidade à tracção é determinado pelo declive da curva tensão-deformação na sua zona de proporcionalidade, também designada por zona elástica. Para a determinação do declive da curva de ensaio, recorreu-se ao método dos mínimos quadrados, aproximando todos os pontos do domínio elástico por uma recta de regressão linear, obtendo-se assim uma equação da recta do tipo:

$$\sigma = E\varepsilon_{ext} + \sigma_0 \quad 3.17$$

onde, ε_{ext} é a deformação determinada a partir dos valores lidos no extensómetro e σ_0 , é a tensão residual a que o provete estava inicialmente sujeito.

A Figura 3.30 mostra apenas a região do domínio elástico típica, dos ensaios de tracção das placas de compósito, reforçadas com fibras de juta. Os valores da deformação indicados no gráfico da Figura 3.30 foram obtidos utilizando o extensómetro e como tal, designam-se por deformação extensométrica.

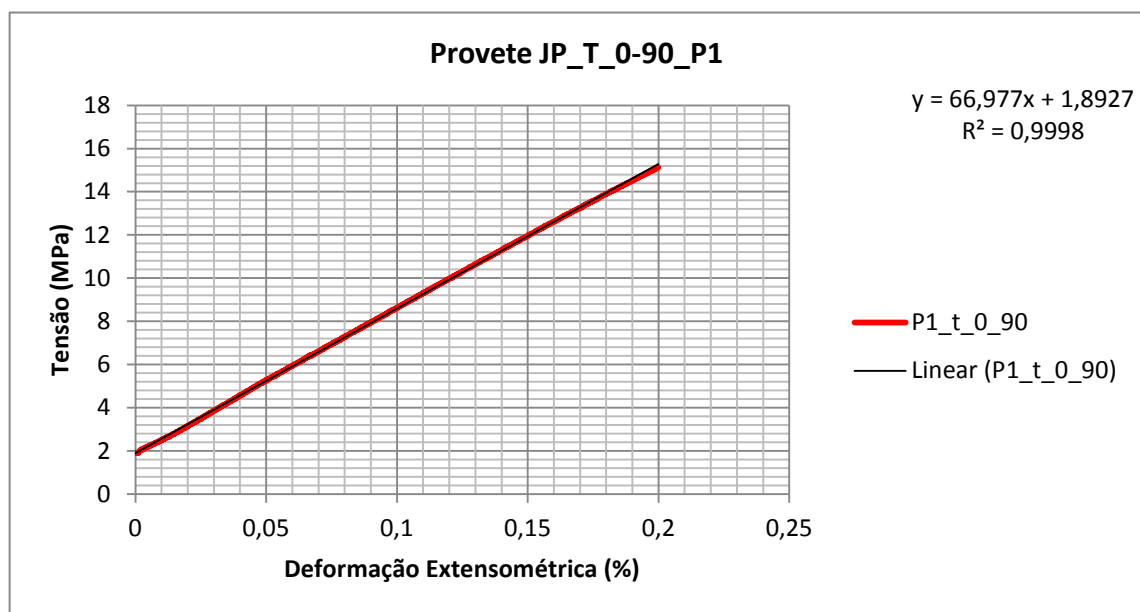


Figura 3.30 – Representação da parte inicial da curva tensão-deformação, relativa ao domínio elástico do provete com a referência JP_T_0-90_P1 e indicação da equação da recta de regressão linear ajustada aos pontos experimentais

Na figura anterior é possível observar o comportamento proporcional entre a tensão e a deformação, que permite a determinação do módulo de elasticidade. Para além disso, está também patente na figura anterior, a equação da recta de regressão linear ajustada aos pontos experimentais. Para o caso particular do provete com a referência JP_T_0-90_P1, a equação da recta indica um valor do módulo de elasticidade de 6697,7 MPa ($66,977 \times 100$, uma vez que a deformação extensométrica se encontra em percentagem).

Relativamente ao parâmetro R^2 (coeficiente de correlação), também indicado na Figura 3.30, importa referir que o seu valor dá indicação da qualidade de ajuste da recta de regressão

linear aos pontos experimentais. Quanto mais próximo do valor unitário, melhor a recta de regressão se ajusta aos pontos. Assim, no caso particular do provete com a referência JP_T_0-90_P1, o valor de R^2 é bastante próximo da unidade, o que indica um ajuste quase perfeito da recta dos mínimos quadrados nos valores experimentais.

Importa acrescentar que o módulo de elasticidade à tracção foi determinado para valores de deformação extensométrica entre 0,0 e 0,20 % uma vez que para este intervalo de deformação, todos os provetes ensaiados apresentaram proporcionalidade entre a tensão e a deformação aplicada.

Relativamente à determinação da deformação na rotura importa referir que não foi utilizado o extensómetro. O cálculo da deformação na rotura foi efectuado a partir dos dados obtidos do deslocamento entre as amarras da máquina universal de ensaios, tendo em conta a distância inicial entre amarras de 150 mm, igual para todos os ensaios de tracção. A tensão de rotura é obtida pelo quociente entre a carga máxima aplicada ao provete durante o ensaio e o valor da área da secção transversal inicial do provete.

3.2.3.3. Ensaio de Flexão

Para determinar o módulo e resistência à flexão, foram também cortados provetes das placas de compósito produzidas. Submeteram-se provetes com 100×15×5 (mm) a ensaios de flexão em três pontos, de acordo com a norma ISO 14125 [63], numa máquina universal de ensaios mecânicos Shimadzu Autograph AG-X Series. Os ensaios realizaram-se à temperatura ambiente com uma célula de carga de 100 kN, a uma velocidade de deflexão de 2 mm/min. A Figura 3.31 é uma representação esquemática do ensaio de flexão em três pontos.

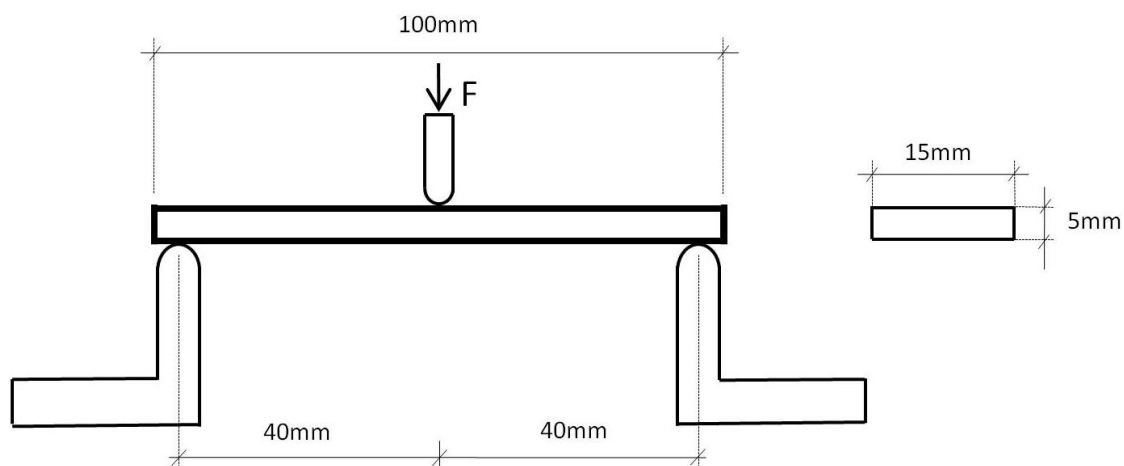


Figura 3.31 – Representação esquemática do ensaio de flexão em três pontos

Os provetes para levar a cabo os ensaios de flexão, foram cortados de cada um dos compósitos produzidos. De cada placa, foram extraídos quatro provetes rectangulares com aproximadamente 15 mm de largura, 100 mm de comprimento e espessura de 5mm. Para evitar a rotura por compressão nos provetes, foi utilizado um punção com um raio de 1/8 de polegada, como mostra a Figura 3.32.



Figura 3.32 – Pormenor do raio do punção utilizado nos ensaios de flexão

Os ensaios de flexão são muito utilizados, não só devido à simplicidade geométrica dos provetes utilizados, mas também porque neste ensaio não são introduzidas tensões na zona das amarras como acontece no ensaio de tracção. Deve no entanto garantir-se que as tensões normais são predominantes na secção transversal dos provetes, em detrimento das tensões de corte. Esta garantia é conseguida quando o quociente entre a distância entre apoios e a espessura do provete (L/h) é superior a 16. Neste caso ($L/h > 16$), considera-se então que as tensões variam linearmente ao longo da espessura do provete, sendo tensões de compressão na sua face superior e tensões de tracção na face inferior. Para coeficientes de L/h inferiores a 5 sabe-se que o provete sofrerá rotura por corte [3], que no caso particular do presente estudo, é indesejável dado o objectivo deste ensaio ser a caracterização do compósito à flexão.

Dado o valor da espessura dos provetes, para garantir um coeficiente de $L/h=16$ a distância entre apoios escolhida foi de 80 mm.

Considerando então que as solicitações a que o provete está sujeito são essencialmente tensões normais e que variam linearmente ao longo da espessura do provete, a seguinte expressão determina os valores de tensão de flexão (σ_f) nas fibras exteriores ao logo do ensaio:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad 3.18$$

Onde,

F , é a força transversal aplicada (MPa);

L , é a distância entre apoios (mm);

b , é a largura do provete (mm);

h , é a espessura do provete (mm).

A tensão de rotura à flexão é calculada substituindo na expressão anterior, F , pelo valor da carga máxima medida no ensaio.

A deformação correspondente (ε_f), pode ser determinada através da seguinte expressão:

$$\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2} \quad 3.19$$

Onde, s , é a flecha medida a meio vão no provete.

A Figura 3.33 mostra a curva típica de tensão de flexão-deformação dos ensaios de flexão realizados aos compósitos produzidos. No gráfico da Figura 3.33, os valores do eixo das abcissas determinaram-se utilizando a equação 3.19 enquanto os valores do eixo das ordenadas determinaram-se utilizando a equação 3.18.

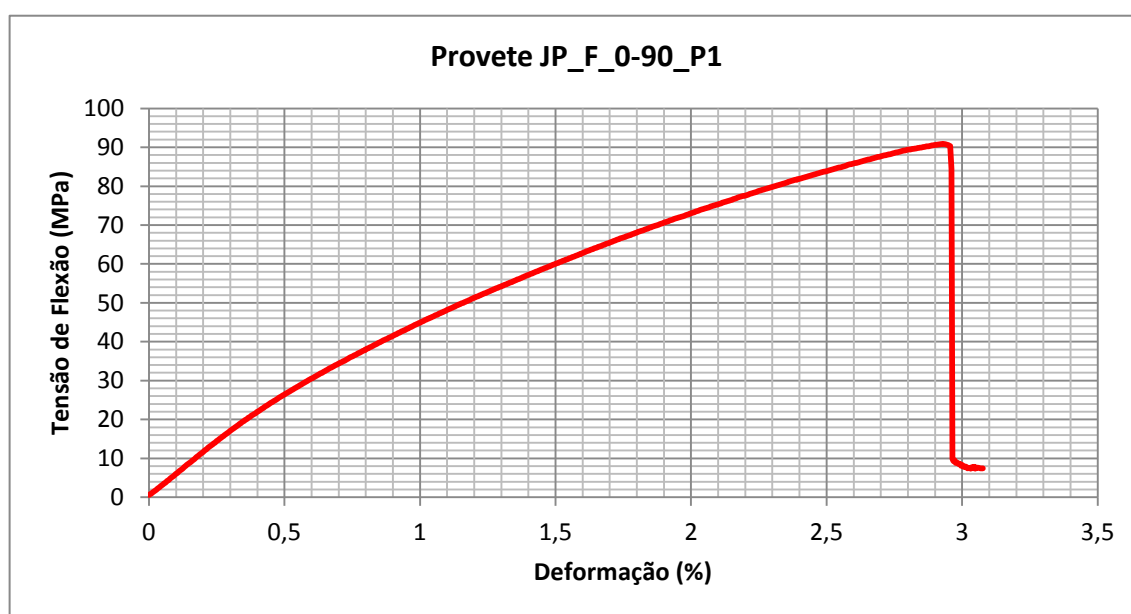


Figura 3.33 – Curva experimental típica dos ensaios de flexão realizados aos compósitos produzidos

Tal como no ensaio de tracção, uma vez que para pequenas deformações iniciais se verifica proporcionalidade entre a tensão e a deformação aplicada, é possível determinar o módulo de elasticidade através da análise do domínio elástico da curva de ensaio.

O módulo de elasticidade à flexão pode ser determinado através de dois procedimentos distintos. No primeiro procedimento, o módulo de elasticidade é calculado com a seguinte expressão:

$$E_f = \frac{L^3 m_d}{4bh^3} \quad 3.20$$

Onde, m_d , é o declive da recta da zona linear da curva carga-deflexão, calculado pelo método dos mínimos quadrados.

Num segundo procedimento possível, o módulo de elasticidade à flexão é determinado através do declive da recta do gráfico de tensão-deformação na zona de proporcionalidade entre a tensão e a deformação. Para tal, o procedimento é semelhante ao descrito no subcapítulo 3.2.3.2. *Ensaio de Tracção*, traçando uma recta de regressão linear que melhor se ajusta aos pontos experimentais.

Uma vez que qualquer um dos dois procedimentos apresentados permite determinar exactamente o mesmo valor do módulo de elasticidade, por uma questão de coerência, optou-se pelo procedimento que já havia sido utilizado na análise do ensaio de tracção.

A Figura 3.34 mostra apenas a região do domínio elástico típica, dos ensaios de flexão das placas de compósito, reforçadas com fibras de juta.

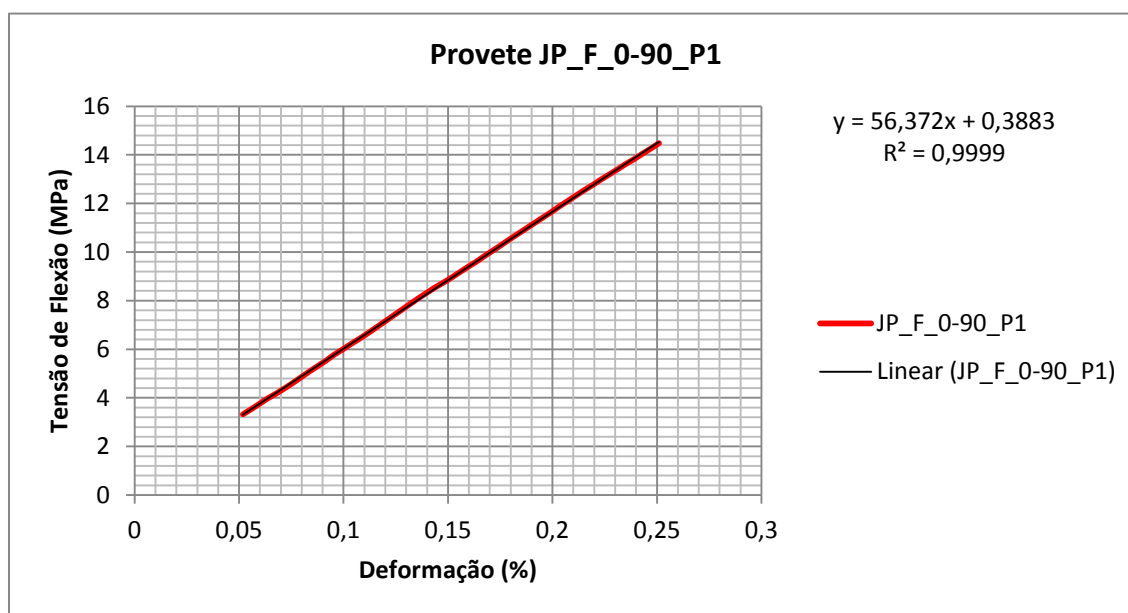


Figura 3.34 - Representação da parte inicial da curva tensão de flexão-deformação, referente ao domínio elástico do provete com a referência JP_F_0-90_P1 e indicação da equação da recta de regressão linear ajustada aos pontos experimentais

Na figura anterior é possível observar o comportamento proporcional entre a tensão e a deformação, que permite a determinação do módulo de elasticidade. Para além disso, está também patente na figura anterior, a equação da recta de regressão linear ajustada aos

pontos experimentais. Para o caso particular do provete com a referência JP_F_0-90_P1, a equação da recta indica um valor do módulo de elasticidade à flexão de 5637,2 MPa ($56,372 \times 100$, uma vez que a deformação se encontra em percentagem).

Importa acrescentar que o módulo de elasticidade à flexão foi determinado para valores de deformação entre 0,05 e 0,25% uma vez que para este intervalo de deformação, todos os provetes ensaiados apresentaram proporcionalidade entre a tensão e a deformação aplicada.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados os principais resultados obtidos, tendo em vista a caracterização das matérias-primas utilizadas no fabrico dos compósitos reforçados por fibras naturais. Resultados experimentais e determinados teoricamente serão agora apreciados, comparados e discutidos.

4.2. Caracterização das matérias-primas

4.2.1. Caracterização do Reforço de Juta

Neste subcapítulo é apresentada a caracterização do tecido de juta utilizado como reforço dos compósitos produzidos. Realizaram-se ensaios tipicamente utilizados na indústria têxtil, com o objectivo de determinar as principais propriedades do tecido. A determinação destas propriedades é bastante importante, uma vez que o seu conhecimento, torna possível a aplicação da lei das misturas, para prever as propriedades mecânicas dos compósitos produzidos. A Tabela 4.1 mostra, em resumo, os valores médios das propriedades determinadas através dos ensaios de caracterização têxtil, efectuados ao tecido de juta. Os resultados individuais de cada ensaio, podem ser consultados no Anexo I da presente dissertação.

Tabela 4.1 – Valores médios e desvios das propriedades determinadas através dos ensaios de caracterização têxtil

Propriedade	Tecido de Juta	
	Trama	Teia
Massa por unidade de superfície (g/m^2)	204 ± 7	
Massa linear ($\text{Tex} = \text{g/km}$)	140 ± 9	143 ± 19
Contração (%)	$5,04 \pm 0,9$	$2,44 \pm 1,2$
Contextura (fios/ cm^2)	$6,6 \pm 0,5$	$7,0 \pm 0$
Massa específica (g/cm^3)	$1,33 \pm 0,03$	
Área média teórica da secção transversal dos fios (mm^2)	$0,106 \pm 0,007$	$0,107 \pm 0,014$
Área média da secção transversal dos fios (mm^2)	$0,110 \pm 0,019$	$0,107 \pm 0,031$
Força máxima (N) - método da tira	$370,2 \pm 51,7$	$431,0 \pm 59,1$
Alongamento na força máxima (%)	$8,58 \pm 0,12$	$4,26 \pm 0,21$
Força por unidade de comprimento (N/mm)	$7,4 \pm 1,0$	$8,6 \pm 1,2$
Tensão média de rotura (MPa)	102 ± 14	115 ± 16
Módulo de elasticidade (GPa)	$3,99 \pm 0,53$	$5,36 \pm 0,64$

Da observação da tabela anterior, facilmente se constata que existem diferenças, entre as propriedades dos fios da trama e da teia. Os fios pertencentes à teia apresentam maior massa linear e mais fios por cm^2 que os fios da trama.

Relativamente à massa específica do tecido de juta, o valor de $1,326 \text{ g/cm}^3$, encontra-se dentro do intervalo de valores apresentados na bibliografia consultada [23, 31].

Os valores teóricos (obtidos através da equação 3.8) e experimentais (determinados através da observação ao microscópio) da área média da secção transversal dos fios do tecido, são bastantes próximos no caso dos fios da teia, e um pouco mais afastados no caso dos fios da trama. Contudo, importa relembrar que as fibras naturais apresentam, normalmente, grande variabilidade de características e, no caso particular do parâmetro “área da secção transversal dos fios”, a área varia de fio para fio e varia também ao longo do comprimento dos fios. Assim, apesar de existirem desvios não muito significativos entre os valores teóricos

e experimentais, o *software* utilizado para a medição da área da secção transversal dos fios, revelou-se uma ferramenta muito útil e que proporciona uma boa precisão.

No caso das propriedades mecânicas, as diferenças entre os fios da trama e da teia, são também evidentes. Da observação dos resultados do ensaio de tracção do tecido de juta, verifica-se que:

- ✓ O alongamento na força máxima, sofrido pela teia, é praticamente metade do alongamento sofrido pela trama.
- ✓ Relativamente à média da carga máxima suportada, a teia apresenta uma resistência cerca de 16,7% superior, comparativamente à média da carga máxima suportada pela trama. A força por unidade de comprimento, segue a mesma tendência da carga máxima, uma vez que são características proporcionais.
- ✓ A tensão de rotura dos fios da teia é aproximadamente 13% superior à tensão de rotura dos fios da trama.
- ✓ Relativamente ao módulo de elasticidade, a diferença entre os dois sistemas de fios é bastante acentuada. O módulo de elasticidade da teia é 34,3% superior ao módulo dos fios da trama.

Os valores do alongamento na rotura, da tensão de rotura e do módulo de elasticidade determinados experimentalmente são consideravelmente diferentes dos valores recolhidos na bibliografia consultada para as fibras de juta. Contudo, é importante ter em consideração que os ensaios realizados ao reforço de juta, foram levados a cabo utilizando fios do tecido e o próprio tecido, enquanto os valores apresentados na bibliografia consultada são referentes a ensaios realizados a feixes de fibras ou mesmo a fibras individuais de juta.

Existem portanto, alguns factores que podem influenciar os valores das propriedades mecânicas do tecido, determinados experimentalmente, e que devem ser levados em consideração:

- ✓ Durante a realização dos ensaios de tracção não foi utilizado um extensómetro, e por isso o deslocamento medido é o deslocamento do travessão móvel da máquina de ensaios. Desta forma, a rigidez do sistema de tracção pode influenciar os resultados obtidos.

- ✓ A área ocupada pelos lúmenes das fibras (cerca de 10% da área da secção transversal das fibras), foi contabilizada como área que contribui efectivamente para a resistência mecânica. Desta forma, a tensão de rotura determinada será inferior à real, uma vez que se considera uma área resistente superior àquela que efectivamente contribui para a resistência mecânica.
- ✓ Os ensaios de tracção levados a cabo, foram realizados utilizando tiras de tecido e não fios individuais. Desta forma, a probabilidade de existirem defeitos ao longo dos vários fios que constituem o tecido, é consideravelmente maior. Assim, a tensão de rotura pode ser influenciada pela grande probabilidade de existir uma grande quantidade de defeitos nos fios de juta.
- ✓ Os fios que constituem o tecido são obtidos através da fiação, que consiste na torção de vários feixes de fibras formando assim fios contínuos. Nos ensaios de tracção do tecido, existe a possibilidade de ocorrer uma acomodação dos fios, isto é, uma rotação na direcção oposta à direcção de torção dos fios, que pode explicar o elevando alongamento na rotura, e o módulo consideravelmente baixo verificado nos ensaios.

4.2.2. Caracterização dos Compósitos Produzidos

Neste subcapítulo é apresentada a caracterização mecânica dos compósitos de poliéster, de epóxido e de PLA, reforçados com tecido de juta. Realizaram-se ensaios de tracção e de flexão aos provetes extraídos dos referidos compósitos, com o objectivo de determinar as principais propriedades mecânicas. Uma análise teórica, utilizando a lei das misturas, foi também realizada tendo como objectivo permitir uma comparação das propriedades estimadas com as propriedades efectivamente conseguidas nas placas de compósito produzidas.

4.2.2.1. Determinação das propriedades da camada

A Tabela 4.2 mostra os valores das propriedades mecânicas previstas, pela aplicação da lei das misturas apresentada no subcapítulo 3.2.3.1, para os compósitos produzidos. Uma vez que o objectivo da sequência de empilhamento escolhida foi proporcionar às placas, propriedades que englobem as características dos dois sistemas de fios (teia e trama), foram utilizados os valores médios das propriedades mecânicas dos fios da teia e da trama.

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas teóricas dos compósitos produzidos, calculadas pela aplicação da lei das misturas

		Poliéster + juta 0_90°	Epóxico + juta 0_90°	PLA + fibras curtas de juta
Propriedades determinadas experimentalmente	Espessura (mm)	5,1	5,3	5,3
	Fracção mássica de fibras	0,32	0,33	0,15
	Fracção volúmica de fibras	0,30	0,29	0,14
	Massa específica das fibras (kg/m ³)	1330		
	Tensão de rotura da juta (MPa)	108		
	Módulo de elasticidade da juta (GPa)	4,68		
	Deformação na rotura (%)	6,42		
Propriedades recolhidas da bibliografia	Massa específica do polímero (kg/m ³)	1200	1130	1250
	Tensão de rotura do polímero (MPa)	55	77	48,3
	Módulo de elasticidade do polímero (GPa)	3,45	3,1	2,1
	Deformação na rotura (%)	2,1	4,5	2,5
Propriedades teóricas calculadas	Tensão de rotura na direcção das fibras (X_1) (MPa)	53,2	85,3	47,7
	Módulo de elasticidade na direcção das fibras (E_1) (GPa)	3,12	2,88	2,05
	Massa específica do compósito (kg/m³)	1239,09	1188,42	1261,38

Uma vez que não foi considerado o teor de vazios para o cálculo das propriedades teóricas dos compósitos, é de esperar que os valores das propriedades determinadas através da aplicação da lei das misturas, sejam superiores aos valores efectivamente atingidos nos ensaios mecânicos. Os resultados teóricos, relativos aos compósitos de poliéster com fibras orientadas a $\pm 45^\circ$, não se encontram apresentados na Tabela 4.2, uma vez que para isso seria necessário estimar outros parâmetros, como por exemplo, o coeficiente de Poisson. Os valores estimados conduziram, provavelmente, à introdução de mais desvios ou erros. Assim, optou-se por apresentar as propriedades teóricas que, presumivelmente, possuem menos erros ou desvios.

Da observação da Tabela 4.2, verifica-se que:

- ✓ Com base nos resultados teóricos, o compósito com maior resistência mecânica e menor massa específica é o epóxico reforçado por fibras de juta alinhadas a 0° e 90° . Por outro lado, comparativamente com o compósito de poliéster, possui um módulo inferior.
- ✓ Os compósitos de poliéster possuem, teoricamente, o maior valor de módulo de todos os compósitos produzidos e uma resistência mecânica na direcção das fibras consideravelmente inferior, comparativamente com a resistência dos compósitos de epóxico.
- ✓ Os compósitos de PLA reforçados com juta, são aqueles que em teoria possuem menor resistência mecânica, menor módulo e maior massa específica. Contudo, é importante ter em atenção que, no caso dos compósitos de PLA, foi usada uma fracção volúmica de fibras bastante baixa, comparativamente com os compósitos de poliéster e de epóxico.

Geralmente, a lei das misturas permite realizar boas previsões das propriedades mecânicas dos compósitos. Contudo, apenas depois de ser realizada a comparação com os resultados efectivamente obtidos, através dos ensaios experimentais, podem ser retiradas conclusões sobre a exactidão e precisão dos valores apresentados na Tabela 4.2.

4.2.2.2. Resultados do Ensaio de Tracção

A Tabela 4.3 mostra, em resumo, os resultados da tensão de rotura, módulo de elasticidade e alongamento na rotura, obtidos nos ensaios de tracção. Os resultados individuais de cada ensaio, podem ser consultados no Anexo II da presente dissertação.

Tabela 4.3 – Propriedades experimentais em tracção dos compósitos produzidos

Compósito	Tensão média de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade médio (GPa)	Deformação média na rotura (%)
Poliéster + Fibras do tecido alinhadas a 0-90°	56,97 ± 7,15	7,04 ± 0,51	1,92 ± 0,15
Poliéster + Fibras do tecido alinhadas a ±45°	45,75 ± 1,07	5,14 ± 0,22	1,62 ± 0,03
Epóxido + Fibras do tecido alinhadas a 0-90°	58,83 ± 4,80	5,99 ± 0,30	3,49 ± 0,45
PLA + Fibras curtas	48,01 ± 2,05	5,05 ± 0,38	6,09 ± 0,75

Com base nos resultados pode concluir-se que:

- ✓ O tecido de juta que reforçou os compósitos de poliéster com fibras alinhadas a 0° e 90°, exerceu a sua função de reforço, uma vez que se verifica um ligeiro aumento da resistência à tracção, comparativamente com o polímero não reforçado. O módulo destes laminados, aumentou também em 104,0% relativamente à resina não reforçada. Comparativamente à resina não reforçada, a deformação na rotura, decresceu substancialmente.
- ✓ Os compósitos de poliéster, reforçados com as fibras alinhadas a ±45°, revelaram menor resistência mecânica, menor módulo e menor deformação na rotura, comparativamente aos laminados com as fibras alinhadas a 0° e 90°, como seria de esperar. Contudo, estes laminados apresentaram os menores desvios em todas as propriedades, comparativamente com qualquer um dos outros compósitos testados.

- ✓ Os laminados de epóxico reforçado com fibras alinhadas a 0° e 90° , apesar de evidenciarem uma tensão de rotura inferior à do polímero não reforçado, apresentam um módulo 93,2% superior com a introdução do reforço fibroso de juta.
- ✓ Os compósitos de PLA, não evidenciaram qualquer alteração significativa em termos de resistência mecânica, uma vez que a tensão de rotura do polímero é sensivelmente idêntica à tensão de rotura do compósito. Já no que diz respeito ao módulo de elasticidade e à deformação na rotura, verificam-se grandes aumentos com a introdução do reforço de juta. Quer a deformação na rotura quer o módulo de elasticidade, sofreram um aumento de 140% aproximadamente.

Comparativamente com os resultados obtidos pela aplicação da lei das misturas verifica-se que os compósitos de poliéster com fibras alinhadas a 0° e 90° apresentam valores, de resistência mecânica, teóricos e experimentais bastante próximos. Por outro lado, os compósitos de epóxico, possuem resistência mecânica cerca de 45% inferior à prevista teoricamente. No caso dos compósitos de PLA, a diferença entre a resistência mecânica prevista e a experimental é praticamente insignificante. Uma vez que a lei das misturas foi aplicada não tendo em consideração o teor de vazios dos compósitos, seria de esperar que os resultados experimentais da resistência mecânica fossem, em todos os casos, inferiores aos valores teoricamente esperados. Este facto, pode estar relacionado com o processo de determinação da área da secção transversal das tiras de tecido ensaiadas à tracção.

Numa perspectiva geral verificou-se também que, o módulo de elasticidade calculado teoricamente pela aplicação da lei das misturas, é bastante inferior aquele que efectivamente os compósitos possuem. A razão desta discrepância poderá ser explicada, também em grande parte pelo processo de determinação da área da secção transversal das tiras de tecido, sujeitas aos ensaios de tracção. Tal como foi referido anteriormente, a determinação do parâmetro tensão de rotura em detrimento da tenacidade do tecido, é susceptível a erros uma vez que o diâmetro dos fios é mal definido, possuem grande variação e por isso é difícil de quantificar. Uma vez que o módulo de elasticidade das fibras foi determinado com base na zona de proporcionalidade da curva de tensão-deformação, existe a possibilidade de serem cometidos erros na determinação do módulo das fibras.

4.2.2.3. Resultados do Ensaio de Flexão

A Tabela 4.4 mostra, em resumo, os resultados médios para a tensão de rotura à flexão, módulo de elasticidade à flexão e deformação na rotura, obtidos nos ensaios de flexão. Os resultados individuais de cada ensaio, podem ser consultados no Anexo II da presente dissertação.

Tabela 4.4 – Propriedades experimentais à flexão dos compostos produzidos

Compósito	Tensão de rotura média à flexão (MPa)	Módulo de elasticidade médio à flexão (GPa)	Deformação média na rotura (%)
Poliéster + Fibras do tecido alinhadas a 0-90°	91,48 ± 3,83	5,88 ± 0,17	2,81 ± 0,12
Poliéster + Fibras do tecido alinhadas a ±45°	78,55 ± 1,38	4,31 ± 0,03	3,16 ± 0,15
Epóxido + Fibras do tecido alinhadas a 0-90°	86,54 ± 7,24	5,07 ± 0,81	2,75 ± 0,17
PLA + Fibras curtas	81,89 ± 1,47	3,51 ± 0,26	2,94 ± 0,22

Com base nos resultados pode concluir-se que:

- ✓ Existe uma melhoria das propriedades mecânicas do poliéster reforçado com fibras alinhadas a 0° e 90°, comparativamente com a resina de poliéster não reforçada. O reforço fibroso de juta, incrementou a resistência mecânica em 14,4% e o módulo de elasticidade em 70,4%.
- ✓ Os valores da tensão de rotura e do módulo de elasticidade à flexão do compósito de poliéster reforçado com fibras de juta alinhadas a ±45°, são inferiores aos valores alcançados pelo laminado constituído pelos mesmos materiais mas com as fibras alinhada a 0° e 90°, como seria de esperar. Tal como aconteceu nos ensaios de tracção, os provetes com fibras a ±45°, são os que apresentam propriedades com um menor desvio padrão.

- ✓ Os provetes de epóxico reforçado mostram um decréscimo da resistência à flexão comparativamente com os valores da resina não reforçada, contudo o módulo de elasticidade à flexão aumentou cerca de 58,4%.
- ✓ Quer a tensão de rotura, quer o módulo de elasticidade dos compósitos de PLA, não sofreram alterações significativa com a introdução do reforço, comparativamente com as propriedades apresentadas para o polímero não reforçado.

Numa perspectiva geral, verifica-se que os compósitos com maior resistência à flexão e maior módulo de elasticidade à flexão, são os laminados de poliéster com as fibras alinhadas a 0° e 90°, seguidos dos laminados de epóxico com reforço orientado também a 0° e 90°. Entre os compósitos produzidos observa-se também que a maior deformação na rotura, assim como os menores desvios das propriedades experimentais à flexão, são conseguidos pelas placas de poliéster com fibras de jutas orientadas a $\pm 45^\circ$. Os compósitos de PLA reforçados por fibras curtas, são aqueles que apresentam menor módulo de elasticidade (à flexão) e a sua resistência mecânica e deformação na rotura, assemelha-se aos compósitos de poliéster com fibras orientadas a $\pm 45^\circ$.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Análise dos Resultados

O estudo realizado na presente dissertação permitiu uma análise das propriedades mecânicas de compósitos reforçados por fibras naturais. Vários tipos de polímeros, com custos e propriedades bastante distintas, foram reforçados por fibras de juta com diferentes orientações. As propriedades mecânicas dos referidos compósitos foram determinadas através de ensaios de tracção e flexão. Para além da caracterização dos compósitos, foram também analisadas as propriedades têxteis do tecido de juta usado como reforço. A determinação das propriedades têxteis permitiu não só confirmar a grande variabilidade que as fibras naturais possuem, como permitiu ainda realizar uma previsão teórica das propriedades mecânicas dos compósitos, por aplicação da lei das misturas.

Observando os resultados da bibliografia consultada e os próprios resultados dos ensaios experimentais levados a cabo nos compósitos produzidos, verifica-se que a metodologia utilizada para a determinação do módulo de elasticidade das fibras não é apropriada, uma vez que os resultados são bastante inferiores aos referenciados na bibliografia. Além disso, comparando os resultados experimentais dos ensaios dos compósitos com os previstos teoricamente verifica-se, mais uma vez, que o cálculo do módulo de elasticidade das fibras é bastante inferior ao real. Relativamente à tensão de rotura das fibras, verifica-se também um desfasamento entre os valores experimentais e os valores apresentados na bibliografia, contudo, essa diferença é menos acentuada que no caso do módulo. Desta forma conclui-se que a utilização do ensaio de tracção do tecido (método da tira) é vantajoso para determinar a força máxima e o alongamento na força máxima, e é pouco preciso para a determinação da tensão de rotura e muito duvidoso para determinação do módulo de elasticidade.

Na Tabela 5.1, para além das propriedades dos polímeros não reforçados (propriedades fornecidas pelos fabricantes ou da bibliografia consultada) estão também apresentados os resultados experimentais dos ensaios de tracção.

Tabela 5.1 – Propriedades mecânicas à tracção dos diferentes compósitos produzidos e das respectivas matrizes

Matriz	Propriedades à tracção				
	Fracção volúmica de fibras de juta (%)	Orientação do reforço	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na rotura (%)
Poliéster	0	-	55	3,45	2,1
	30	0°-90°	56,97	7,04	1,92
	30	±45°	45,75	5,14	1,62
Epóxido	0	-	77	3,1	4,5
	30	0°-90°	58,83	5,99	3,49
PLA	0	-	48,3	2,1	2,5
	14	Aleatória	48,01	5,05	6,09

Da observação dos resultados obtidos conclui-se que:

A introdução do reforço fibroso de juta tem efeitos diferentes, nas diversas matrizes analisadas. Se por um lado a introdução de reforço fibroso orientado a 0° e 90° numa matriz de poliéster incrementou a resistência mecânica, por outro lado, o mesmo tipo de reforço introduzido numa matriz de epóxido teve consequências exactamente opostas, diminuindo a resistência mecânica. Relativamente à resistência mecânica dos compósitos de PLA, não se verificaram alterações significativas após a introdução do reforço de fibras curtas de juta.

Em geral verifica-se que a introdução de reforço fibroso incrementa os valores do módulo de elasticidade comparativamente com os valores dos polímeros não reforçados.

Relativamente à deformação na rotura, é possível observar que para as matrizes termoendurecíveis a deformação na rotura decresceu ligeiramente comparativamente com a resina não reforçada. Já no que diz respeito à matriz termoplástica de PLA, verifica-se que a introdução de fibras curtas promoveu um grande aumento da deformação na rotura.

Na Tabela 5.2, para além das propriedades dos polímeros não reforçados (propriedades fornecidas pelos fabricantes ou da bibliografia consultada) estão também apresentados os resultados experimentais dos ensaios de flexão.

Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas à flexão dos diferentes compósitos produzidos e das respectivas matrizes

Matriz	Fracção volúmica de fibras de juta (%)	Orientação do reforço	Propriedades à flexão		
			Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na rotura (%)
Poliéster	0	-	80	3,45	-
	30	0°-90°	91,48	5,88	2,81
	30	±45°	78,55	4,31	3,16
Epóxico	0	-	115	3,2	7,7
	30	0°-90°	86,54	5,07	2,75
PLA	0	-	82,7	3,83	-
	14	Aleatória	81,89	3,51	2,94

Da observação dos resultados obtidos conclui-se que:

A introdução do reforço fibroso de juta nos polímeros ensaiados à flexão, provocou efeitos semelhantes aos observados no ensaio de tracção. Os compósitos de poliéster reforçados com fibras alinhadas a 0° e 90°, possuem uma resistência mecânica à flexão superior à resina não reforçada, enquanto os compósitos de epóxico, exactamente com o mesmo tipo de reforço, possuem uma resistência significativamente inferior à da resina. Ainda relativamente aos compósitos de poliéster, conclui-se que os laminados com fibras orientadas a ±45° atingem uma maior deformação na rotura e menor resistência à flexão, comparativamente com os compósitos de poliéster com fibras alinhadas a 0° e 90°. A introdução de reforço sob a forma de fibras curtas de juta na matriz de PLA, não revelou alterações significativas na resistência à flexão.

Relativamente ao módulo de elasticidade à flexão, os resultados mostram que para as resinas termoendurecíveis, a introdução do reforço fibroso promove o aumento do módulo, enquanto no caso da matriz termoplástica analisada, verifica-se uma ligeira descida do valor do módulo.

Todos os compósitos analisados, possuem um valor de deformação na rotura à flexão bastante próximo dos 3%. No caso dos compósitos de epóxico, conclui-se que o reforço de juta provoca uma queda acentuada do valor da deformação na rotura comparativamente com a resina não reforçada

Numa perspectiva geral, verifica-se que os compósitos com melhores propriedades mecânicas e que vêem as suas propriedades melhoradas através da incorporação do reforço fibroso de juta, são os laminados de poliéster com fibras orientadas a 0° e 90°. Neste caso, parece existir uma boa adesão entre as fibras e a matriz. No caso dos compósitos de epóxico e de poliéster com fibras orientadas a $\pm 45^\circ$, apesar de se verificar um aumento do módulo, comparativamente com a resina não reforçada, possuem menor resistência mecânica à tracção e à flexão, levando a crer que o reforço não actua como seria desejável. Os compósitos de PLA, ecologicamente muito vantajosos relativamente a todos os demais, possuem propriedades mecânicas inferiores, mas bastante próximas das propriedades dos laminados de matriz termoendurecível testados.

A Tabela 5.3, mostra uma comparação das propriedades mecânicas dos compósitos produzidos no presente trabalho com materiais tradicionalmente usados em aplicações de engenharia.

Tabela 5.3 – Comparação das propriedades mecânicas dos compósitos produzidos (reforçados por fibras naturais) com os materiais mais tradicionais (adaptado de [64])

Material	Massa específica (kg/m ³)	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade à tracção (GPa)	Resistência à tracção específica (MPa)	Módulo de elasticidade específico (GPa)
Compósito de poliéster e juta	1240	57	7,0	46,0	5,6
Compósito de epóxico e juta	1190	59	6,0	50,0	5,0
Compósito de PLA e juta	1260	48	5,0	38,1	4,0
Polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP)	1750	151	22	86,3	12,6
Polímero termoplástico reforçado com fibras longas (LFT)	1070	100	3,4	93,4	3,2
Nylon 66 (PA)	1060	45	2,8	42,4	2,6
Madeira	700	50	13	71,4	18,6
Alumínio (puro)	2700	50	70	18,5	25,9
Liga de alumínio	2810	300	71	106,8	25,3
Aço	7850	400	210	50,9	26,8

Da observação da Tabela 5.3, verifica-se que o módulo de elasticidade específico dos compósitos reforçados com fibras naturais de juta é superior quer ao do Nylon, quer ao dos polímeros termoplásticos reforçados com fibras longas. Comparativamente com o aço, os compósitos de juta possuem uma resistência mecânica muito inferior. Contudo, o valor da resistência à tracção específica do aço é bastante próximo do valor dos compósitos produzidos, principalmente dos compósitos de epóxico. Relativamente aos polímeros reforçados com fibras de vidro, verifica-se que estes, possuem propriedades específicas cerca de duas vezes superiores às melhores propriedades específicas alcançadas pelos compósitos de juta. Apesar das propriedades dos compósitos produzidos serem comparáveis com as propriedades de alguns dos materiais tradicionais apresentados, existem ainda muitos aspectos que podem ser explorados e estudados, tendo em vista a melhoria das propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras de juta.

5.2. Trabalhos Futuros

O estudo levado a cabo na presente dissertação constitui apenas parte de uma completa e detalhada caracterização mecânica de compósitos reforçados com fibras naturais. Para um eventual trabalho futuro, sugere-se a realização dos seguintes estudos:

- ✓ Análise da resistência à fractura interlaminar de laminados reforçados com juta;
- ✓ Determinação das propriedades mecânicas das fibras de juta, através do ensaio de monofilamentos;
- ✓ Análise experimental das propriedades mecânicas das resinas, não reforçadas;
- ✓ Caracterização de compósitos com diferentes teores volúmicos de fibras, de forma a determinar a quantidade óptima de fibras;
- ✓ Utilização de diferentes matrizes termoplásticas, como por exemplo o polipropileno;
- ✓ Análise do efeito de tratamentos superficiais aplicado às fibras de juta, como por exemplo o tratamento alcalino;
- ✓ Fabrico e caracterização de compósitos de PLA reforçados com fibras com outros comprimentos;
- ✓ Determinação das propriedades mecânicas de impacto, resistência ao corte, fluência, fadiga e dureza de compósitos reforçados por fibras de juta;
- ✓ Análise da interface entre fibras e matriz através da observação ao microscópio electrónico;
- ✓ Análise da superfície de rotura dos compósitos, para compreensão do mecanismo de fractura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. de S. F. de Moura, M.F., A.M.B. de Moraes, and A.G. de Magalhães, *Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. 2005: Publindústria.
2. Klyosov, A.A., *Wood-Plastic Composites*. 2007: Wiley.
3. Silva, J.F., *Estudo de Estruturas Compósitas Termoplásticas produzidas por enrolamento filamental*, 2006, Universidade do Porto.
4. Macedo, V.F.S.d., *Modificação Química de fibras de celulose para produção de novos materiais compósitos bifásicos monocomponentes*, 2009, Universidade de Aveiro: Aveiro.
5. Rashed, H.M.M.A., M.A. Islam, and F.B. Rizvi, *Effects of process parameters on tensile strength of jute fiber reinforced thermoplastic composites*. Journal of Naval Architecture and Marine Engineering, 2006. **3**(1): p. 1-6.
6. Bledzki, A.K., V.E. Sperber, and O. Faruk, *Natural And Wood Fibre Reinforcement in Polymers*. 2002: iSmithers Rapra Publishing.
7. Roe, P.J. and M.P. Ansell, *Jute-reinforced polyester composites*. Journal of Materials Science, 1985. **20**(11): p. 4015-4020.
8. Daimler. *Mercedes-Benz Cars*. 2012 [cited 2012 12/13]; Available from: http://media.daimler.com/dcmedia/0-921-658896-1-788666-1-0-0-0-1-12759-614216-0-0-@ac.clink104771_3842-0-0-0-0.html.
9. JohnsonControls. *Natural Materials*. 2012 [cited 2012 12/13]; Available from: http://www.johnsoncontrols.com/content/us/en/products/automotive_experience/featured-stories/Natural_Materials/Natural_Fibers/NF_EP.html.
10. Romão, C.M.N., *Estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais*, in *Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial* 2003, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
11. Thomas, S. and L.A. Pothan, *Natural Fibre Reinforced Polymer Composites: From Macro to Nanoscale*. 2009: Éd. des Archives contemporaines.
12. Chung, D.D.L., *Composite Materials: Functional Materials for Modern Technologies*. 2003: Springer.
13. Fakirov, S. and D. Bhattacharyya, *Handbook of Engineering Biopolymers: Homopolymers, Blends and Composites*. 2007: Hanser.
14. Biron, M., *Thermosets and Composites: Technical Information for Plastics Users: Technical Information for Plastics Users*. 2003: Elsevier Science.
15. Bank, L.C., *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*. 2006: Wiley.
16. Smith, W.F., *Principles of Materials Science and Engineering*. Third ed. 1998: McGraw-Hill.

17. Miracle, D.B. and S.L. Donaldson, *ASM Handbook, Volume 21 - Composites*, ASM International.
18. Hoa, S.V., *Principles of the Manufacturing of Composite Materials*. 2009: DEStech Publications.
19. Yu, L., *Biodegradable Polymer Blends and Composites from Renewable Resources*. 2009: Wiley.
20. Smith, R., *Biodegradable Polymers for Industrial Applications*. 2005: Woodhead.
21. Kalia, S. and L. Avérous, *Biopolymers: Biomedical and Environmental Applications*. 2011: Wiley.
22. Daniel, I.M. and O. Ishai, *Engineering Mechanics of Composite Materials*. 1994: Oxford University Press.
23. Eichhorn, S.J., J. Hearle, and M. Jaffe, *Handbook of Textile Fibre Structure: Volume 2: Natural, Regenerated, Inorganic and Specialist Fibres*. 2009: Woodhead Pub.
24. Pinheiro, M.F.d.C.A., *Compósitos Avançados Reforçados com Fibras Naturais para Construção*, in *Engenharia Mecânica* 2008, Universidade de Aveiro: Aveiro.
25. Vasiliev, V.V. and E. Morozov, *Mechanics and Analysis of Composite Materials*. 2001: Elsevier Science.
26. Kaith, B.S. and I. Kaur, *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites: Green Chemistry and Technology*. 2011: Springer.
27. Mohanty, A.K., M. Misra, and L.T. Drzal, *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. 2005: Taylor & Francis.
28. Baillie, C., *Green Composites: Polymer Composites and The Environment*. 2004: Woodhead.
29. Pickering, K.L., M. Institute of Materials, and Mining, *Properties and Performance of Natural Fibre Composites*. 2008: Woodhead Publishing Limited.
30. Rong, M.Z., et al., *The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites*. *Composites Science and Technology*, 2001. **61**(10): p. 1437-1447.
31. Mwaikambo, L.Y., *Review of the history, properties and application of plant fibres*. *African Journal of Science and Technology*, 2006. **7**: p. 120-133.
32. Lewin, M., *Handbook of Fiber Chemistry, Third Edition*. 2010: Taylor & Francis.
33. Franck, R.R. and T. Institute, *Bast And Ohter Plant Fibres*. 2005: Woodhead.

34. Müssig, J. and C. Stevens, *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*. 2010: Wiley.
35. IJSG. *International Jute Study Group*. 2003 [cited 2013 05/14]; Available from: <http://www.jute.org>.
36. Blackburn, R.S., *Biodegradable and sustainable fibres*. 2005: Woodhead Publishing.
37. Ghosh, T., *Handbook on Jute*. 1983: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
38. Laranjeira, E., et al., *Influence of Fiber Orientation on the Mechanical Properties of Polyester/Jute Composites*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2006. **25**(12): p. 1269-1278.
39. Eichhorn, S.J., et al., *Current international research into cellulosic fibres and composites*. *Journal of Materials Science*, 2001. **36**: p. 2107 – 2131.
40. Sever, K., et al., *Surface treatments of jute fabric: The influence of surface characteristics on jute fabrics and mechanical properties of jute/polyester composites*. *Industrial Crops and Products*, 2012. **35**(1): p. 22-30.
41. Dantas, R.R., et al., *Estudo de compósitos de poliéster/tecido de juta para construção de silos cilíndricos verticais*, in *Electronica de Materiais e Processos* 2008.
42. Mishra, V. and S. Biswas, *Physical and Mechanical Properties of Bi-directional Jute Fiber Epoxy Composites*. *Procedia Engineering*, 2013. **51**(0): p. 561-566.
43. Mir, A., et al., *Study of Mechanical and Thermomechanical Properties of Jute/Epoxy Composite Laminate*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2010. **29**(11): p. 1669-1680.
44. Hossain, M.R., et al., *Tensile Behavior of Environment Friendly Jute Epoxy Laminated Composite*. *Procedia Engineering*, 2013. **56**(0): p. 782-788.
45. Rodríguez, E.S. and A. Vázquez, *Alkali treatment of jute fabrics: Influence on the processing conditions And the mechanical properties of their Composites*, in *The 8th International Conference on Flow Processes in Composite Materials (FPCM8)* 2006: Douai, France.
46. Khan, R.A., et al., *Comparative Studies of Mechanical and Interfacial Properties Between Jute and E-glass Fiber-reinforced Polypropylene Composites*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2010. **29**(7): p. 1078-1088.
47. Khan, R.A., et al., *Fabrication and Characterization of Jute Fabric-Reinforced PVC-based Composite*. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2011. **25**(1): p. 45-58.
48. Yang, Y., M. Murakami, and H. Hamada, *Molding Method, Thermal and Mechanical Properties of Jute/PLA Injection Molding*. *Journal of Polymers and the Environment*, 2012. **20**(4): p. 1124-1133.

49. Aldajah, S., G. Alawsi, and S.A. Rahmaan, *Impact of sea and tap water exposure on the durability of GFRP laminates*. Materials & Design, 2009. **30**(5): p. 1835-1840.
50. Gougeon Brothers, I., *Vacuum Bagging Techniques*, 2010: Bay City, Michigan, USA.
51. John, M.J. and S. Thomas, *Biofibres and biocomposites*. Carbohydrate Polymers, 2008. **71**(3): p. 343-364.
52. SICOMIN, *SR 1500 Epoxy laminating system*, 2001.
53. RESINEX, *NatureWorks®PLA Polymer 3051D*, 2010.
54. NP EN 12127 - *Têxteis - Tecidos. Determinação da massa por unidade de superfície em amostras de pequenas dimensões*, 1999.
55. NF G 07-101 - *Détermination de la longueur de fil absorbée (Length of absorbed yarn: knitted fabric)*, 1971.
56. Truong, M., *Establishment of Protocols for Natural Fibre Density Measurement*, University of Manitoba in Collaboration with Composites Innovation Centre Manitoba Inc. (CIC), 2007.
57. Andrade, F. *DEM ISEP - Laboratório de Metalografia - Procedimento do Equipamento para o Lixamento*. 2013 [cited 2013 03/15]; Available from: <http://www.dem.isep.ipp.pt/data/LABS/LMET/files/optipphoto.pdf>.
58. Andrade, F. *DEM ISEP - Laboratório de Metalografia - Procedimento do Equipamento para o Polimento*. 2013 [cited 2013 03/15]; Available from: http://www.dem.isep.ipp.pt/data/LABS/LMET/files/ROTOPOL_2_2.pdf.
59. NP EN ISO 13934-1 - *Têxteis - propriedades de tracção dos tecidos, in Parte 1: determinação da força máxima e do alongamento à força máxima pelo método da tira* 2001.
60. Goswami, B.C., R.D. Anandjiwala, and D.M. Hall, *Textile Sizing*. 2004: MARCEL DEKKER Incorporated.
61. Friedrich, K., S. Fakirov, and Z. Zhang, *Polymer Composites: From Nano- to Macro-Scale*. 2005: Springer. p. 189-212.
62. ISO 527 - *Determination of tensile properties, in Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites*, 1997.
63. ISO 14125 - *Fibre-reinforced plastic composites - Determination of flexural properties*, 1998.
64. Ashby, M.F., *Materials Selection in Mechanical Design*. 2004: Elsevier Science.

ANEXOS

ANEXO I – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO TECIDO DE JUTA

Determinação da massa por unidade de superfície

Tabela de dados e resultados experimentais:

N.º Provete	Massa da amostra (g)	Massa por unidade de superfície (g/m ²)
1	2,1043	210
2	2,0314	203
3	2,009	201
4	2,1234	212
5	1,9294	193
Média ± Desvio padrão	2,0395 ± 0,0698	204 ± 7

Determinação da massa linear

Tabela de dados e resultados experimentais dos fios da trama:

N.º Amostra	Massa do fio (g)	Comprimento do fio (cm)	Tex (g/km)	Área teórica da secção transversal dos fios (mm ²)
1	0,0772	52,1	148	0,111
2	0,0792	52,0	152	0,115
3	0,0831	52,3	159	0,120
4	0,0752	52,6	143	0,107
5	0,0698	52,8	132	0,099
6	0,0678	52,6	129	0,097
7	0,0702	52,7	133	0,100
8	0,0696	52,8	132	0,099
9	0,0735	53,9	136	0,103
10	0,0738	52,8	140	0,105
Média ± Desvio padrão			140 ± 9	0,106 ± 0,007

Tabela de dados e resultados experimentais dos fios da teia:

N.º Amostra	Massa do fio (g)	Comprimento do fio (cm)	Tex (g/km)	Área teórica da secção transversal dos fios (mm ²)
1	0,0727	52,0	140	0,105
2	0,0754	53,0	142	0,107
3	0,0707	51,0	139	0,104
4	0,0690	51,0	135	0,101
5	0,0567	51,0	111	0,084
6	0,0733	51,0	144	0,108
7	0,0956	50,8	188	0,141
8	0,0662	51,1	130	0,097
9	0,0815	50,9	160	0,120
10	0,0696	50,8	137	0,103
Média ± Desvio padrão			143 ± 19	0,107 ± 0,014

Contração

Tabela de dados e resultados experimentais dos fios da trama:

N.º Amostra	Comprimento do fio (cm)	Contração do fio (%)
1	52,1	4,03
2	52,0	3,85
3	52,3	4,40
4	52,6	4,94
5	52,8	5,30
6	52,6	4,94
7	52,7	5,12
8	52,8	5,30
9	53,9	7,24
10	52,8	5,30
Média ± Desvio padrão		5,04 ± 0,9

Tabela de dados e resultados experimentais dos fios da teia:

N.º Amostra	Comprimento do fio (cm)	Contração do fio (%)
1	52,0	3,85
2	53,0	5,66
3	51,0	1,96
4	51,0	1,96
5	51,0	1,96
6	51,0	1,96
7	50,8	1,57
8	51,1	2,15
9	50,9	1,77
10	50,8	1,57
Média ± Desvio padrão		2,44 ± 1,2

Contextura do tecido

Tabela de dados e resultados experimentais dos fios da trama e da teia

N.º Amostra	Número de fios da trama / cm ²	Número de fios da teia / cm ²
1	6	7
2	7	7
3	7	7
4	7	7
5	6	7
Média ± Desvio padrão	6,6 ± 0,5	7,0 ± 0

Determinação da massa específica do tecido de juta com base no princípio de Arquimedes

Tabela de dados e resultados experimentais:

N.º Provete	Massa da amostra (g)	ΔV (ml)	ρ_{tecido} (g/cm ³)
1	0,2410	0,18	1,34
2	0,3292	0,25	1,32
3	0,2846	0,22	1,29
4	0,2217	0,16	1,39
5	0,2622	0,20	1,31
6	0,2930	0,22	1,33
7	0,2658	0,20	1,33
8	0,2574	0,20	1,29
9	0,3280	0,25	1,31
10	0,2709	0,20	1,35
Média ± Desvio padrão			1,33 ± 0,03

Determinação da área da secção transversal dos fios

Tabela de dados e resultados experimentais dos fios da trama:

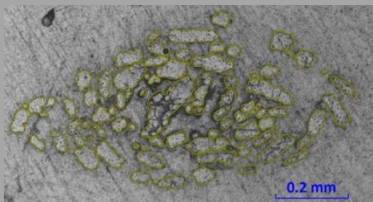
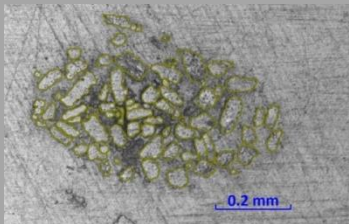
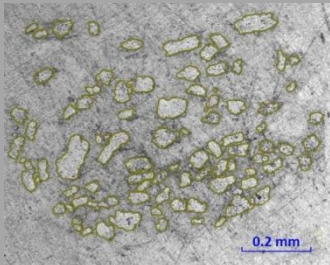
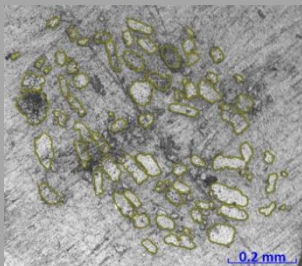
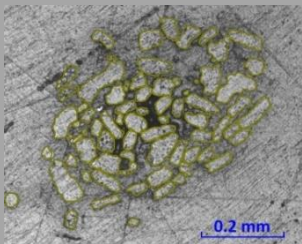
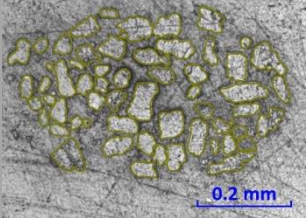
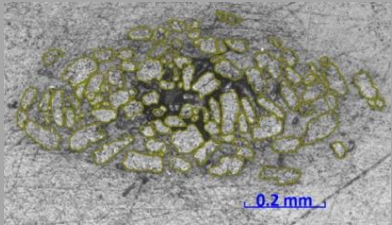
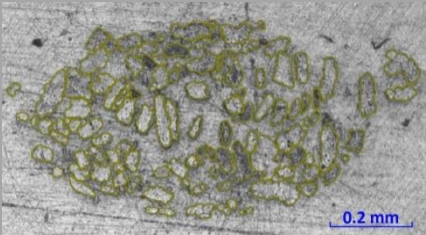
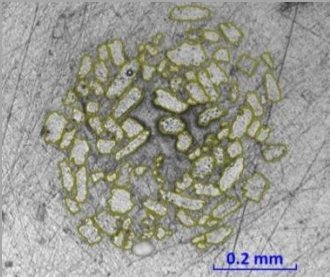
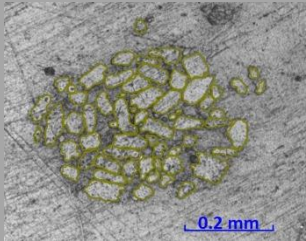
N.º Amostra	Fotografia microscópica dos fios de juta (trama)	N.º de feixes por fio	Área da secção transversal dos fios de juta (mm ²)
1		75	0,123
2		71	0,091
3		93	0,133
4		75	0,115
5		72	0,091
Média ± Desvio padrão		77,2 ± 9,0	0,110 ± 0,019

Tabela de dados e resultados experimentais dos fios da teia:

N.º Amostra	Fotografia microscópica dos fios de juta (teia)	N.º de feixes por fio	Área da secção transversal dos fios de juta (mm ²)
1		58	0,078
2		96	0,122
3		110	0,113
4		94	0,149
5		62	0,074
Média ± Desvio padrão		84,0 ± 22,8	0,107 ± 0,031

Caracterização mecânica do tecido de juta

Tabela de dados e resultados experimentais dos fios da trama e da teia:

		Provetes					Média ± Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	
Trama	Força máxima (N)	295,2	413,0	345,6	376,4	421,0	370,2 ± 51,7
	Alongamento na força máxima (%)	8,56	8,76	8,44	8,60	8,56	8,58 ± 0,12
	Força por unidade de comprimento (N/mm)	5,9	8,3	6,9	7,5	8,4	7,4 ± 1,0
	Tensão de rotura (MPa)	80,96	113,27	94,78	103,23	115,45	102 ± 14
	Módulo de elasticidade (GPa)	3,16	4,42	3,91	4,00	4,47	3,99 ± 0,53
Teia	Força máxima (N)	479,0	392,0	367,2	410,5	506,0	431,0 ± 59,1
	Alongamento na força máxima (%)	4,200	4,025	4,588	4,213	4,263	4,26 ± 0,21
	Força por unidade de comprimento (N/mm)	9,6	7,8	7,3	8,2	10,1	8,6 ± 1,2
	Tensão de rotura (MPa)	127,68	104,47	97,88	109,42	134,95	115 ± 16
	Módulo de elasticidade (GPa)	6,00	5,65	4,65	4,71	5,79	5,36 ± 0,64

ANEXO II – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS PRODUZIDOS

Propriedades Mecânica à tracção dos compósitos de Juta e Poliéster (0°-90°)

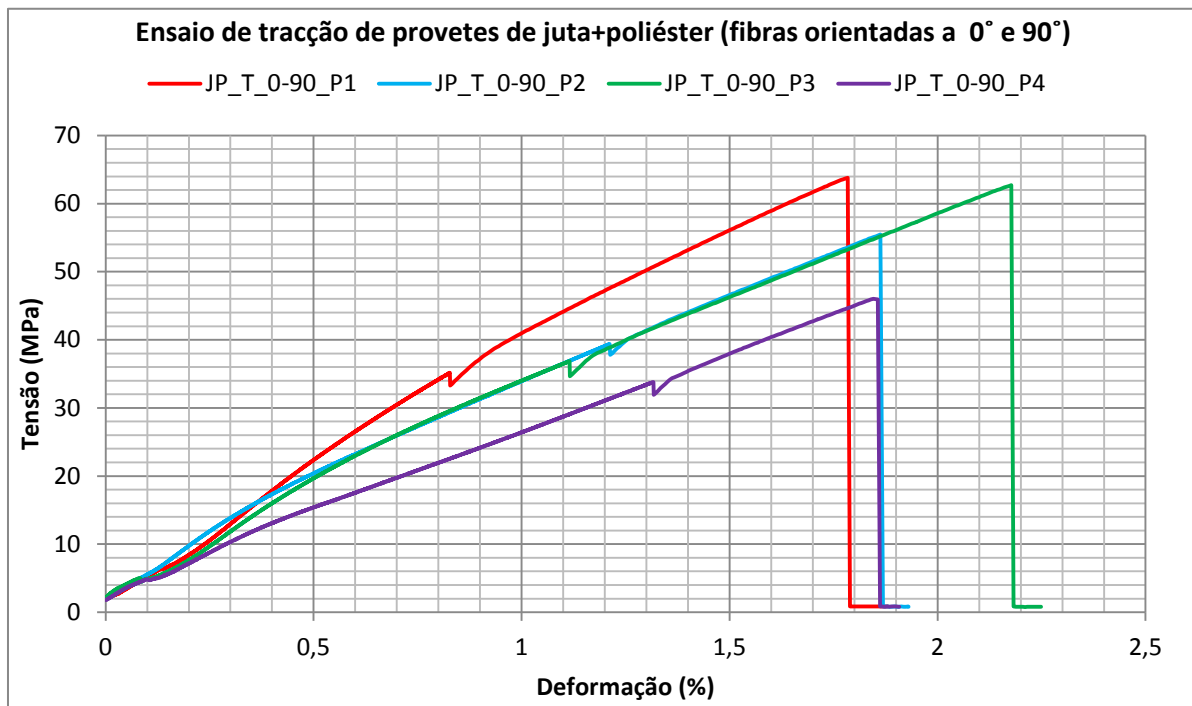


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de tracção:

Proвете	Largura média (mm)	Espessura média (mm)	Área da secção transversal (mm ²)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na rotura (%)
JP_T_0-90_P1	25,10	5,00	125,30	63,81	6,70	1,78
JP_T_0-90_P2	26,10	5,00	130,30	55,46	7,65	1,86
JP_T_0-90_P3	26,60	5,10	136,50	62,70	7,42	2,18
JP_T_0-90_P4	25,10	5,20	130,70	45,91	6,39	1,86
Média				56,97	7,04	1,92
Desvio Padrão				7,15	0,51	0,15

Propriedades Mecânica à tracção dos compósitos de Juta e Poliéster ($\pm 45^\circ$)

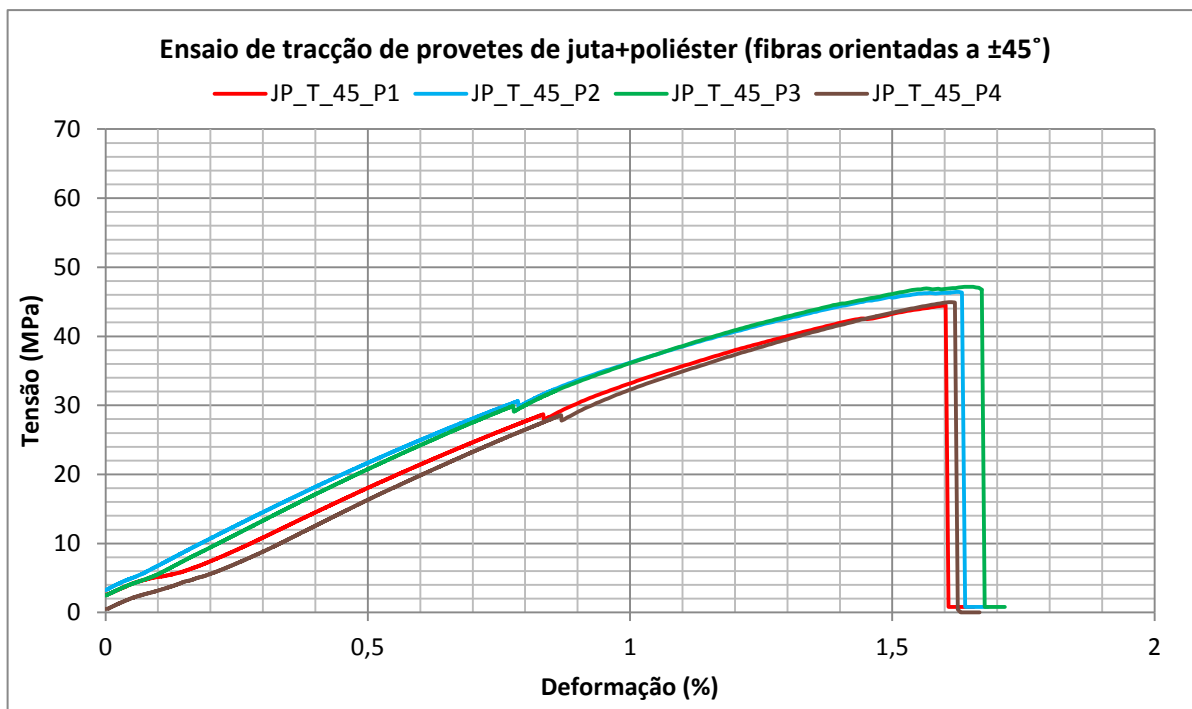


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de tracção:

Provetes	Largura média (mm)	Espessura média (mm)	Área da secção transversal (mm ²)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na rotura (%)
JP_T_45_P1	25,70	5,30	135,40	44,50	4,76	1,60
JP_T_45_P2	24,80	5,30	131,30	46,40	5,26	1,62
JP_T_45_P3	25,80	5,30	136,10	47,16	5,25	1,65
JP_T_45_P4	25,90	5,20	135,20	44,95	5,29	1,61
Média				45,75	5,14	1,62
Desvio Padrão				1,07	0,22	0,02

Propriedades Mecânica à tracção dos compósitos de Juta e Epóxico (0°-90°)

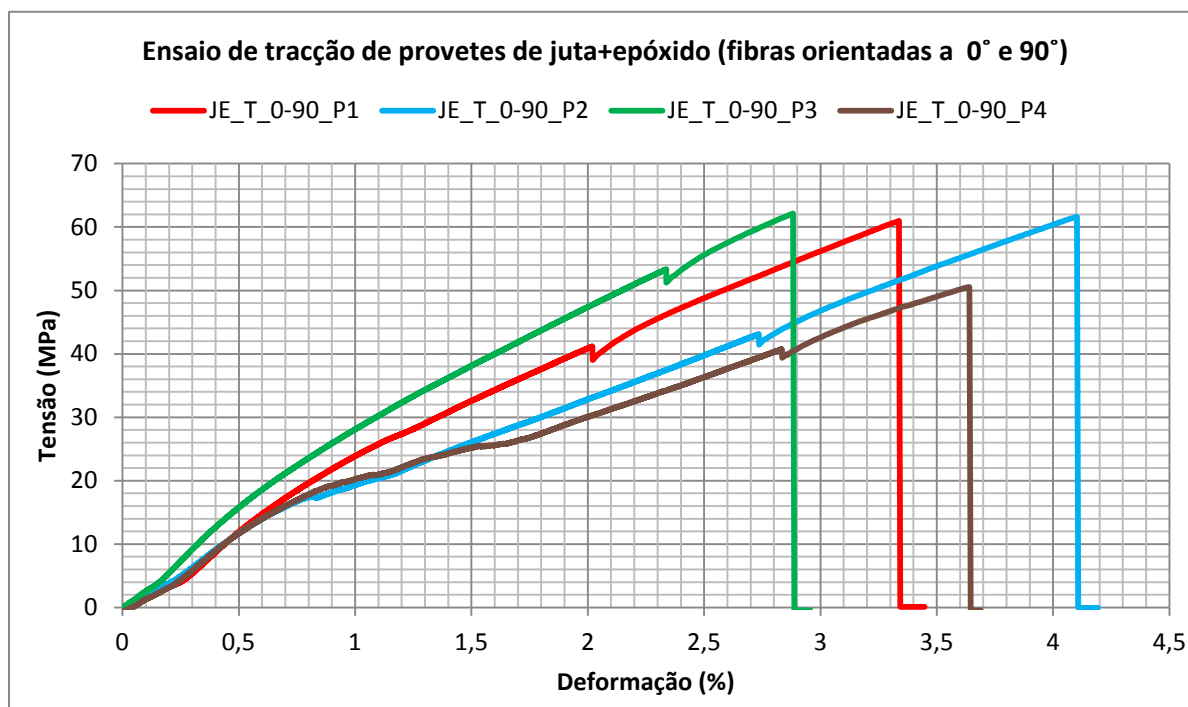


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de tracção:

Provet	Largura média (mm)	Espessura média (mm)	Área da secção transversal (mm ²)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na rotura (%)
JE_T_0-90_P1	28,30	5,50	155,65	60,97	5,61	3,33
JE_T_0-90_P2	27,10	5,30	143,63	61,65	5,95	4,1
JE_T_0-90_P3	26,90	5,30	142,57	62,15	6,45	2,88
JE_T_0-90_P4	27,10	5,50	149,05	50,55	5,94	3,64
Média				58,83	5,99	3,49
Desvio Padrão				4,80	0,30	0,45

Propriedades Mecânica à tracção dos compósitos de Juta e PLA (fibras aleatórias)

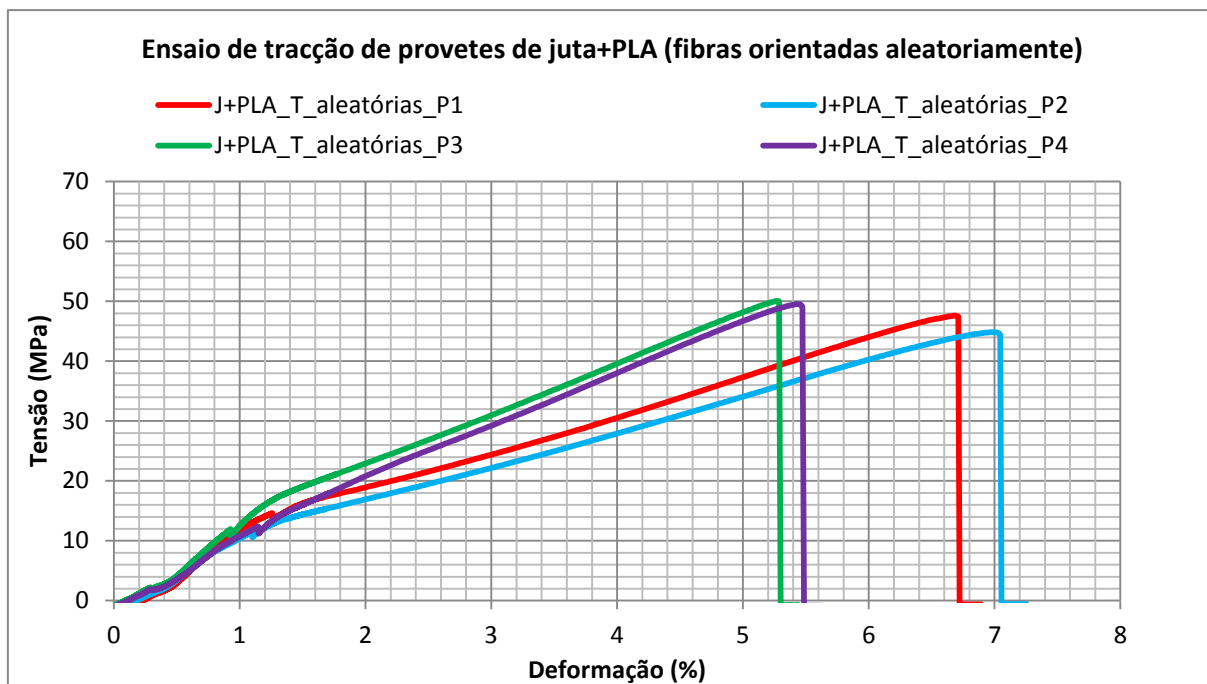


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de tracção:

Proвете	Largura média (mm)	Espessura média (mm)	Área da secção transversal (mm ²)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na rotura (%)
J+PLA_T_aleatórias_P1	24,78	8,28	205,01	47,61	5,71	6,69
J+PLA_T_aleatórias_P2	24,68	8,53	210,35	44,84	4,82	6,97
J+PLA_T_aleatórias_P3	25,10	6,55	164,41	50,07	4,78	5,27
J+PLA_T_aleatórias_P4	23,25	6,40	148,80	49,54	4,90	5,44
Média				48,01	5,05	6,09
Desvio Padrão				2,05	0,38	0,75

Propriedades Mecânica à flexão dos compósitos de Juta e Poliéster (0°-90°)

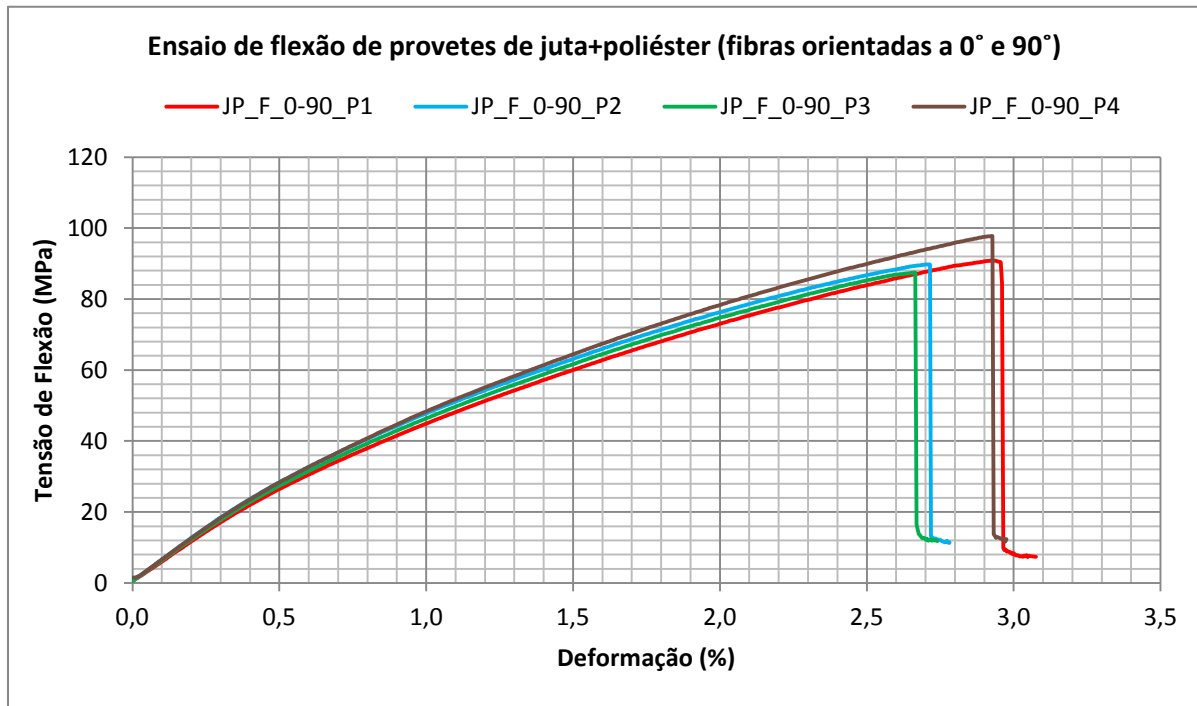


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de flexão:

Proвете	Largura média (mm)	Espessura média (mm)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na rotura (%)
JP_F_0-90_P1	17,10	5,10	90,88	5,64	2,93
JP_F_0-90_P2	16,60	5,00	89,77	6,07	2,71
JP_F_0-90_P3	16,30	5,10	87,50	5,83	2,67
JP_F_0-90_P4	16,30	5,10	97,76	5,98	2,93
Média			91,48	5,88	2,81
Desvio Padrão			3,83	0,17	0,12

Propriedades Mecânica à flexão dos compósitos de Juta e Poliéster ($\pm 45^\circ$)

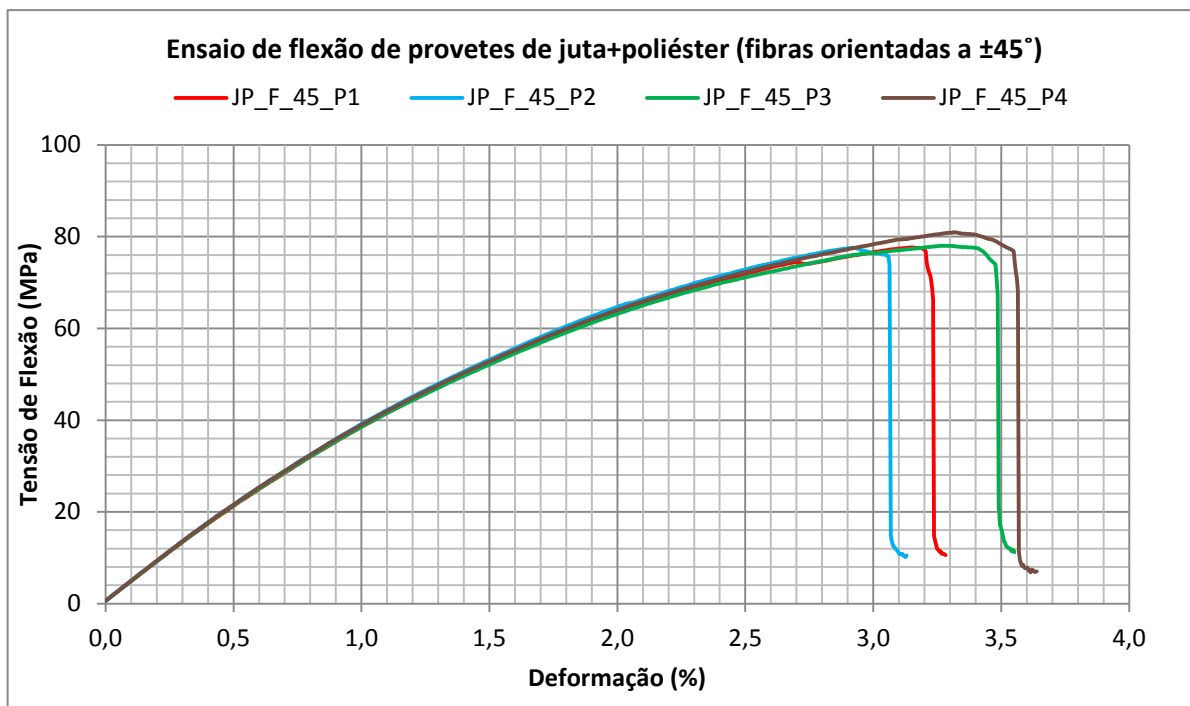


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de flexão:

Proвете	Largura média (mm)	Espessura média (mm)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na rotura (%)
JP_F_45_P1	13,40	5,30	77,64	4,26	3,14
JP_F_45_P2	13,70	5,30	77,60	4,34	2,92
JP_F_45_P3	13,80	5,30	78,04	4,31	3,27
JP_F_45_P4	13,90	5,30	80,93	4,34	3,32
Média			78,55	4,31	3,16
Desvio Padrão			1,38	0,03	0,15

Propriedades Mecânica à flexão dos compósitos de Juta e Epóxico (0°-90°)

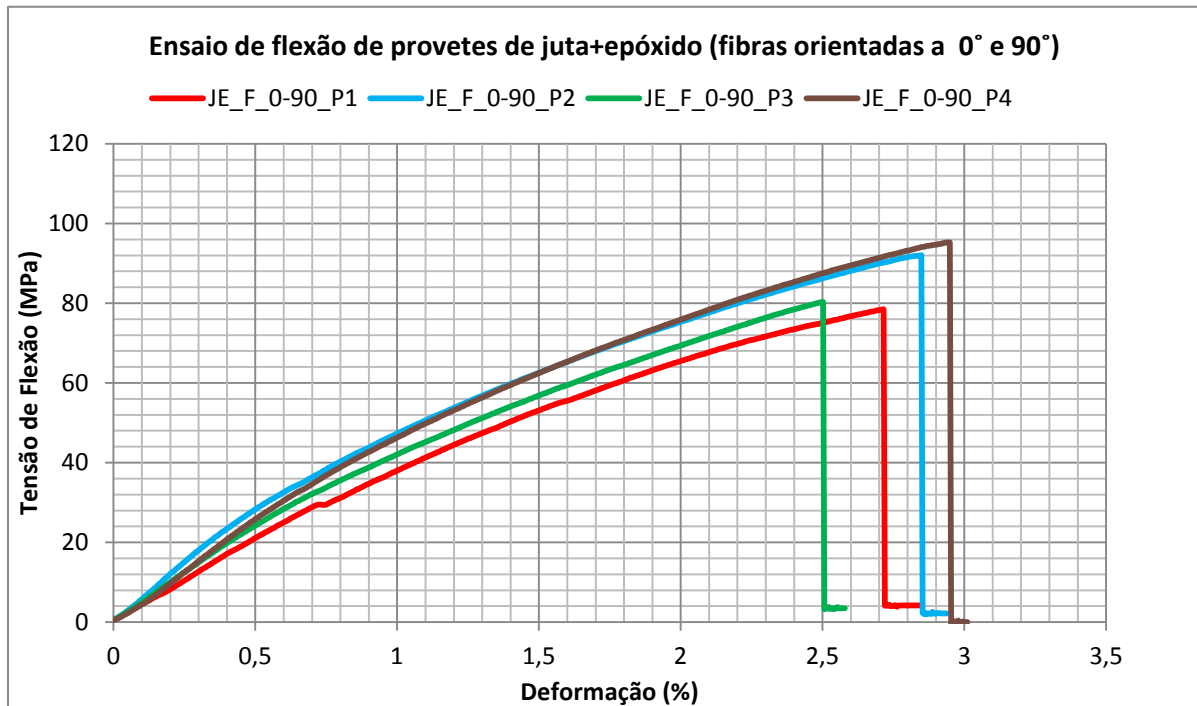


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de flexão:

Provede	Largura média (mm)	Espessura média (mm)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na rotura (%)
JE_F_0-90_P1	14,80	5,50	78,51	3,90	2,72
JE_F_0-90_P2	15,50	5,50	92,03	6,18	2,85
JE_F_0-90_P3	17,00	5,40	80,34	5,01	2,50
JE_F_0-90_P4	16,10	5,40	95,29	5,18	2,95
Média			86,54	5,07	2,75
Desvio Padrão			7,24	0,81	0,17

Propriedades Mecânica à flexão dos compósitos de Juta e PLA (fibras aleatórias)

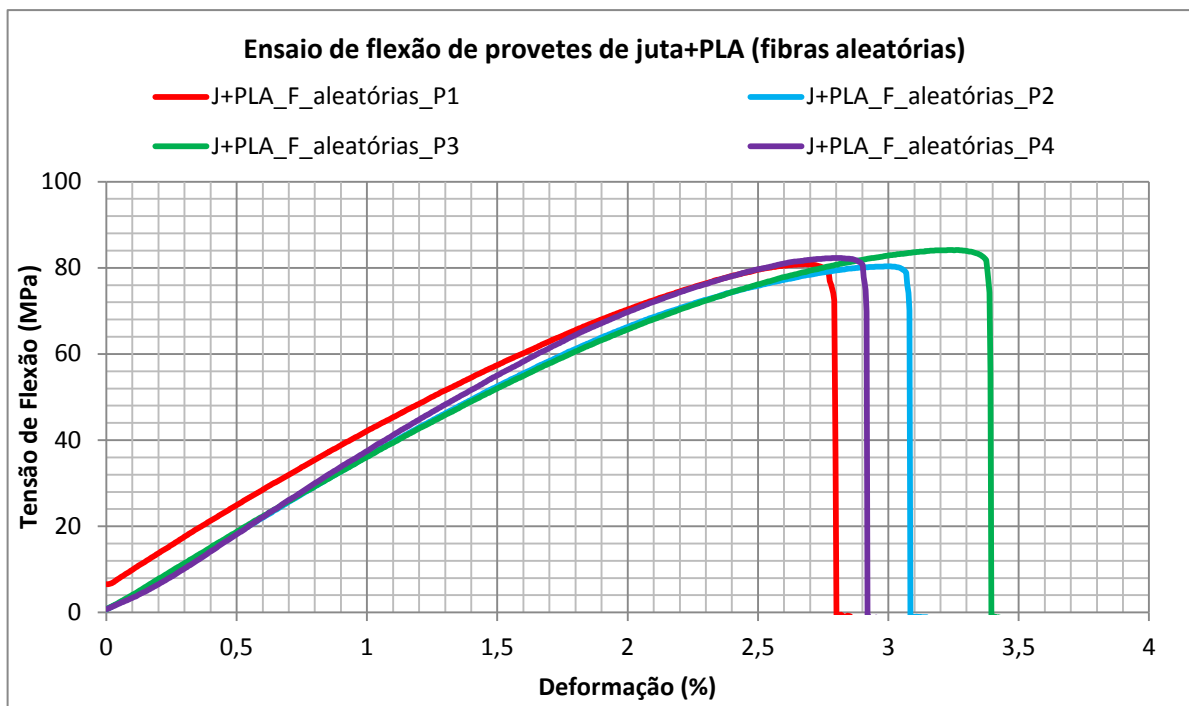


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de flexão:

Proвете	Largura média (mm)	Espessura média (mm)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na rotura (%)
J+PLA_F_aleatórias_P1	14,20	5,48	80,84	3,83	2,69
J+PLA_F_aleatórias_P2	13,95	5,08	80,34	3,43	3,00
J+PLA_F_aleatórias_P3	13,03	5,03	84,12	3,66	3,27
J+PLA_F_aleatórias_P4	14,65	4,73	82,28	3,13	2,80
Média			81,89	3,51	2,94
Desvio Padrão			1,47	0,26	0,22